

DOCUMENT TECHNIQUE

ÉVALUATION DES COÛTS AFFÉRENTS A LA MISE EN OEUVRE DES SOLUTIONS DE GESTION A LONG TERME DES DÉCHETS RADIOACTIFS DE HAUTE ET DE MOYENNE ACTIVITÉ A VIE LONGUE

*Proposition de l'Andra
Tome 1*

Octobre 2014

Pages : 306

CHIFFRAGE CIGÉO EN PHASE ESQUISSE

Synthèse

Identification

CG.TE.F.NTE.AMOA.EEE.0000.14.0107/A

Octobre 2014

Pages : 11

SOMMAIRE

1. Objet	4
2. Hypothèses retenues pour l'évaluation des coûts	5
2.1 <i>Inventaire des déchets radioactifs</i>	5
2.2 <i>Chronique prévisionnelle de livraison des déchets radioactifs à Cigéo</i>	6
2.3 <i>Fermeture des ouvrages</i>	6
3. Périmètre de l'évaluation des coûts	7
4. Evaluation des coûts proposée par l'Andra	8
4.1 <i>Prise en compte des différentes phases du projet</i>	8
4.2 <i>Méthodologie de remontage de l'évaluation des coûts</i>	8
4.3 <i>Evaluation des coûts</i>	9
4.4 <i>Mises à jour de l'évaluation des coûts</i>	10

TABLES DES ILLUSTRATIONS

Figures

Figure 1 - Evolution de l'inventaire des déchets HA retenu pour l'évaluation des coûts	5
Figure 2 - Evolution de l'inventaire des déchets MA-VL retenu pour l'évaluation des coûts	5
Figure 3 - Chronique de référence de livraison des déchets	6

1. Objet

L'article L.542-12 du code de l'environnement définit le processus d'évaluation des coûts de gestion à long terme des déchets radioactifs : « *L'Agence propose au ministre chargé de l'énergie une évaluation des coûts afférents à la mise en œuvre des solutions de gestion à long terme des déchets radioactifs de haute et de moyenne activité à vie longue selon leur nature. Après avoir recueilli les observations des redevables des taxes additionnelles [...] et l'avis de l'Autorité de sûreté nucléaire, le ministre chargé de l'énergie arrête l'évaluation de ces coûts et la rend publique* ».

Conformément à l'article L. 594-1 du code de l'environnement, les exploitants d'installations nucléaires de base évaluent les charges de gestion de leurs déchets radioactifs en prenant notamment en compte l'évaluation fixée en application de l'article L. 542-12.

Le ministère chargé de l'énergie a demandé à l'Andra de lui proposer en 2014 une évaluation des coûts afférents à la mise en œuvre des solutions de gestion à long terme des déchets radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue ainsi qu'un descriptif des points de convergence et divergence résiduels entre l'Andra et les producteurs.

Le descriptif des points de convergence et de divergence entre l'Andra et les producteurs fait l'objet d'un document spécifique élaboré en lien avec les producteurs sous l'égide du ministère chargé de l'énergie. Les principes de conception retenus par l'Andra, en particulier pour l'investissement initial, et les optimisations à approfondir sont partagés par les producteurs. Les divergences de points de vue portent notamment sur la méthodologie de remontage du chiffrage, et notamment le choix de la référence technique pour le chiffrage de base, la valorisation de certaines opportunités à fort enjeu financier et certains coûts unitaires, également à fort enjeu financier.

La présente note a pour objet de présenter la synthèse de l'évaluation des coûts proposée par l'Andra suite aux études d'esquisse esquisse du projet Cigéo et à leur optimisation. Les études d'esquisse ont été évaluées en 2013 par la Commission nationale d'évaluation et l'Autorité de sûreté nucléaire. Elles ont également fait l'objet d'une revue de projet avec des experts industriels externes, organisée sous l'égide du ministère chargé de l'énergie.

2. Hypothèses retenues pour l'évaluation des coûts

2.1 Inventaire des déchets radioactifs

L'évaluation des coûts est réalisée sur la base des hypothèses du scénario industriel défini par AREVA, le CEA et EDF dans le programme industriel de gestion des déchets. Le volume de déchets de moyenne activité à vie longue (MA-VL) pris en compte est ainsi de 73 600 m³. Le volume de déchets de haute activité (HA) est de 10 100 m³.

Ce scénario industriel est établi sur la base d'une durée moyenne d'exploitation des installations existantes de 50 ans. Il suppose la poursuite de la production électronucléaire avec traitement de tous les combustibles usés. Il considère que les matières (uranium et plutonium) non valorisées dans les réacteurs actuels pourront l'être dans des installations futures. Les déchets produits par un éventuel futur parc de réacteurs ne sont pas pris en compte.

Il est à noter que cet inventaire a évolué par rapport aux hypothèses retenues pour les précédents chiffres, en lien notamment avec les hypothèses relatives à la durée d'exploitation des installations.

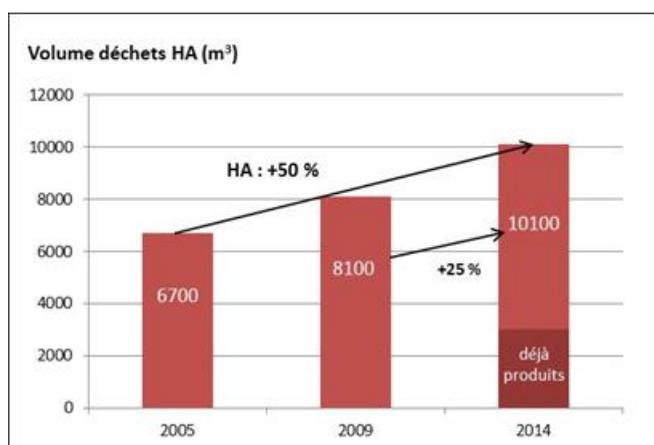


Figure 1 - Evolution de l'inventaire des déchets HA retenu pour l'évaluation des coûts

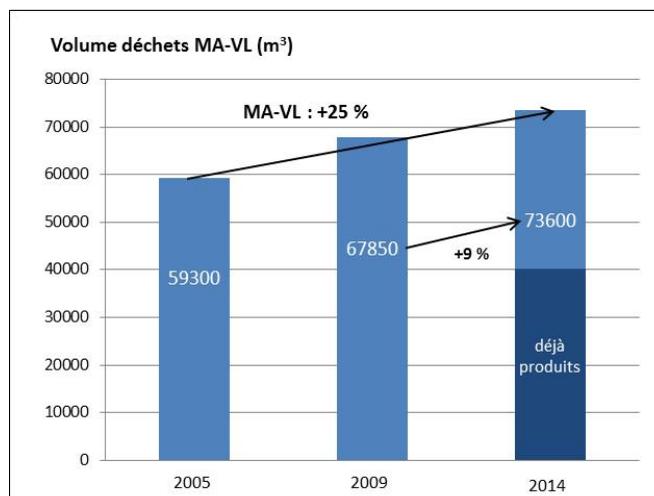


Figure 2 - Evolution de l'inventaire des déchets MA-VL retenu pour l'évaluation des coûts

2.2 Chronique prévisionnelle de livraison des déchets radioactifs à Cigéo

La chronique de référence de livraison des déchets prise en compte dans l'évaluation des coûts a été définie en lien avec AREVA, le CEA et EDF.

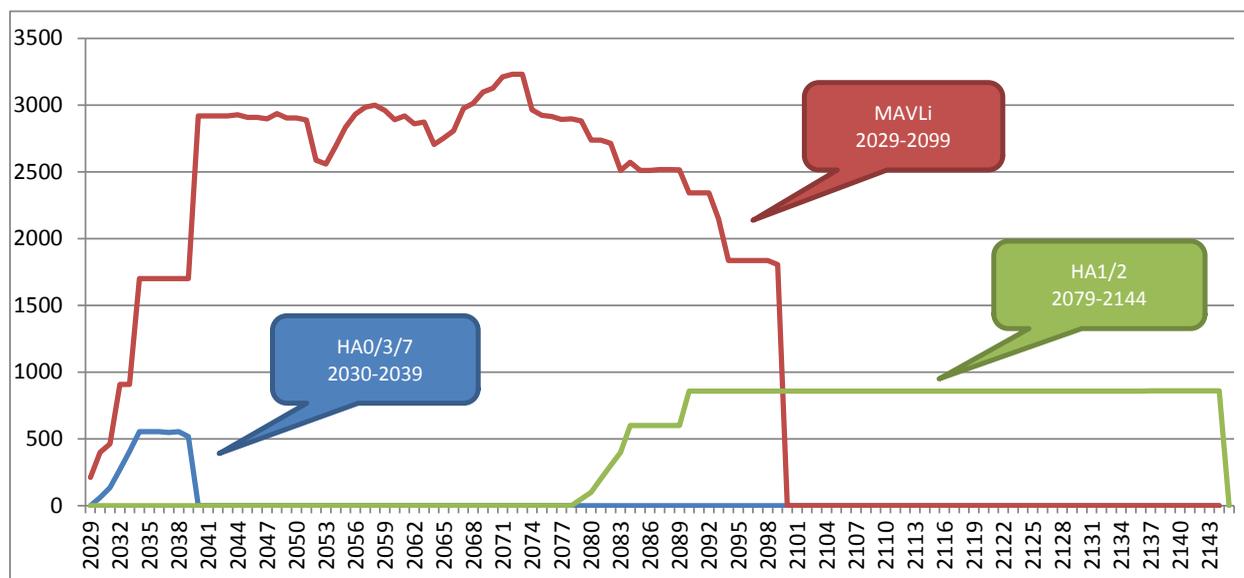


Figure 3 - Chronique de référence de livraison des déchets

2.3 Fermeture des ouvrages

Pour mettre en sécurité de manière définitive les déchets radioactifs, le stockage devra être refermé après son exploitation (obturation des alvéoles, remblaiement des galeries d'accès et scellements des liaisons).

Le stockage est conçu pour pouvoir être refermé de manière progressive. Plusieurs options sont ouvertes, comme par exemple obturer rapidement les alvéoles lorsque les colis de déchets sont stockés ou, au contraire, temporiser cette étape.

Pour la présente évaluation des coûts, il est fait l'hypothèse d'une obturation des alvéoles une dizaine d'années après la fin de leur exploitation. Cette hypothèse ne préjuge pas des conditions de réversibilité qui seront retenues par le Parlement.

3. Périmètre de l'évaluation des coûts

L'évaluation des coûts réalisée par l'Andra couvre le périmètre ci-après. Les hypothèses techniques retenues pour évaluer chaque poste sont présentées dans les notes constituant le dossier technique de chiffrage.

- Investissements :
 - ✓ Etudes de conception industrielle
 - ✓ Travaux préparatoires pour la desserte et l'aménagement du site
 - ✓ Construction des installations (installations de surface, liaisons surface-fond, installation souterraine...) et mise en place des équipements associés
 - ✓ Renouvellement des équipements pendant la durée séculaire d'exploitation (jouvence)
 - ✓ Démantèlement des installations en fin de vie et les opérations de fermeture des ouvrages souterrains
 - ✓ Assurances liées à la construction des ouvrages
 - ✓ Maîtrise d'œuvre en phase de réalisation
 - ✓ Maîtrise d'ouvrage
- Exploitation :
 - ✓ Activités de production et de maintenance
 - ✓ Activités support
 - ✓ Activités liées à la sûreté, la sécurité, la radioprotection et la surveillance de l'environnement
 - ✓ Frais de fonctionnement
 - ✓ Utilités (électricité et fluides)
 - ✓ Pièces de rechange
 - ✓ Conteneurs de stockage
 - ✓ Assurances liées à l'exploitation
- Autres dépenses :
 - ✓ Fiscalité du centre de stockage
 - ✓ Recherche et développement
 - ✓ Essais technologiques
 - ✓ Surveillance après la fermeture du centre de stockage

Les activités sous maîtrise d'ouvrage des producteurs de déchets radioactifs (conditionnement et entreposage des déchets, transport jusqu'au centre de stockage) ainsi que les taxes additionnelles aux installations nucléaires de base dites d'accompagnement économique et de diffusion technologique ne sont pas intégrées dans le périmètre de la présente évaluation des coûts.

Le chiffrage est réalisé aux conditions économiques de janvier 2012.

L'évaluation des coûts est réalisée par l'Andra en coûts bruts non actualisés. Un échéancier de dépenses est joint au dossier de chiffrage.

4. Evaluation des coûts proposée par l'Andra

4.1 Prise en compte des différentes phases du projet

La Commission nationale d'évaluation a recommandé de distinguer dans le chiffrage les différentes phases du projet, en soulignant qu'il est par nature difficile de prévoir aujourd'hui le coût d'installations dont la durée de vie dépasse le siècle et que les estimations du coût du stockage devront être affinées au fur et à mesure. Le Conseil scientifique de l'Agence a également recommandé d'évaluer le coût des travaux sur la base des données actuelles et de prévoir une réévaluation à échéance régulière.

L'Andra a fait le choix pour la présente évaluation des coûts de distinguer la « tranche 1 » (T1), qui couvre les investissements nécessaires à la création du centre et à la phase industrielle pilote, et les « tranches ultérieures » (Tu). Il est à noter que l'évaluation des coûts pour les phases ultérieures du projet bénéficiera du retour d'expérience de la première phase du projet.

L'évaluation des coûts est réalisée sur la base de l'état de l'art actuel et ne préjuge pas des innovations techniques futures et des évolutions de contexte réglementaire qui sont susceptibles d'intervenir pendant la période séculaire de réalisation du stockage.

4.2 Méthodologie de remontage de l'évaluation des coûts

Pour son évaluation des coûts, l'Andra considère de manière globale le coût de base, les incertitudes, les risques et les opportunités selon les modalités suivantes :

- Le « *coût de base* » correspond à l'évaluation du coût de la configuration technique du projet retenue par l'Andra en juin 2014 suite aux études d'esquisse et aux études d'optimisation menées au 1^{er} semestre 2014. L'Andra a intégré dans cette configuration technique les optimisations pour lesquelles elle estime être en mesure d'avoir un dossier suffisamment robuste d'ici l'instruction de la demande d'autorisation de création. Il est à noter que la configuration technique support à l'évaluation du coût de base est susceptible d'évoluer au fur et à mesure de la mise en œuvre du projet¹.
- Les « *opportunités* » désignent les événements dont l'occurrence n'est pas certaine mais qui, s'ils surviennent, affecteront positivement le déroulement l'atteinte des objectifs de performances, de coûts et de délais du projet.
- Les « *risques* » désignent les événements dont l'occurrence n'est pas certaine mais qui, s'ils surviennent, sont susceptibles d'affecter négativement le déroulement et l'atteinte des objectifs de performances, de coûts et de délais du projet.
- Les « *incertitudes d'estimation* » permettent de prendre en compte les imprécisions de l'approche retenue pour l'estimation à ce stade des études.

Les hypothèses retenues par l'Andra pour évaluer le coût de base, les opportunités, les risques et les incertitudes d'estimation sont présentées dans les notes correspondantes du dossier technique de chiffrage. Certains risques et certaines opportunités n'ont pas été valorisés à ce stade par l'Andra car ils nécessitent des études complémentaires en avant-projet.

La méthodologie d'évaluation des coûts mise en œuvre par l'Andra a été auditée par PwC.

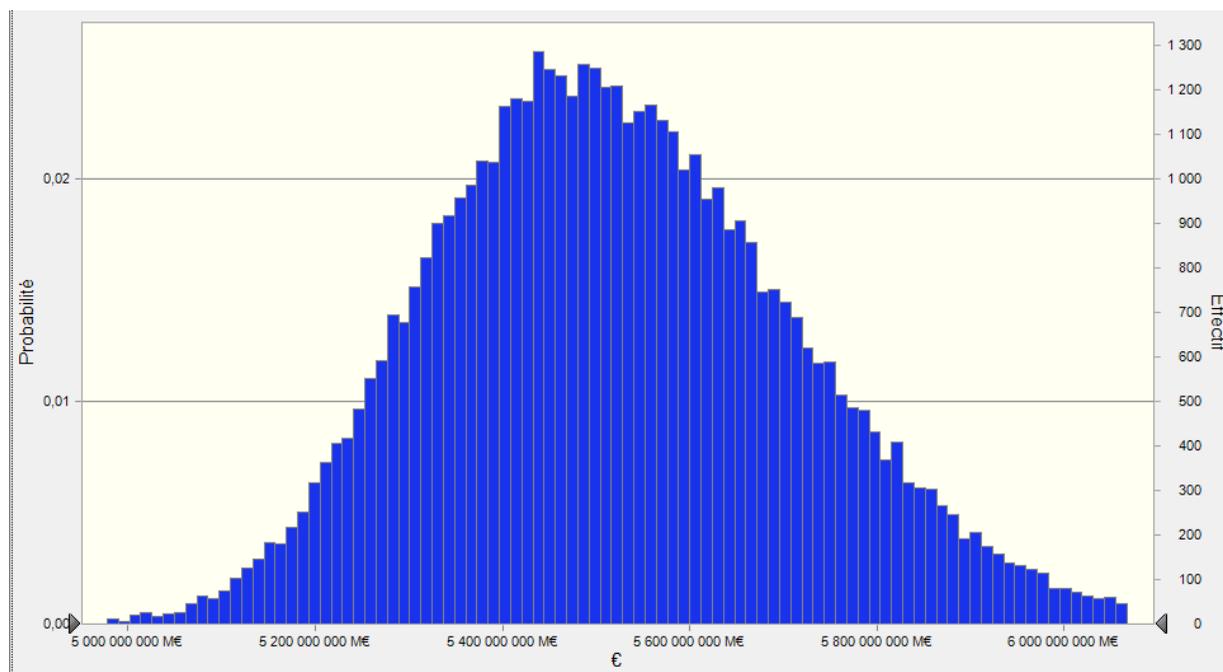
¹ A titre d'illustration, certaines opportunités liées à la conception du stockage sont étudiées dans le cadre du plan de développement du projet et pourront être prises en compte dans le coût de base lorsque l'Andra disposera d'un niveau d'études et de démonstration suffisant. De la même façon, d'autres opportunités sont étudiées en lien avec Areva, le CEA et EDF dans le cadre de l'optimisation des coûts de gestion des déchets depuis leur production jusqu'aux opérations de stockage. Ces opportunités impliquent des modifications des données d'entrée du projet. Certains risques sont également susceptibles de faire évoluer la configuration technique.

4.3 Evaluation des coûts

L'évaluation des coûts jusqu'à la fermeture définitive du stockage peut être décomposée en trois sous-totaux.

- Les investissements de la « tranche 1 » comprennent les études de conception industrielle et les travaux nécessaires à la création du centre de stockage et à la phase industrielle pilote. Cela couvre notamment l'aménagement du site, l'ensemble des installations de surface, les puits et les descenderies et les premières alvéoles de stockage pour les déchets HA et MA-VL qui seront stockés dans le cadre de la phase industrielle pilote.

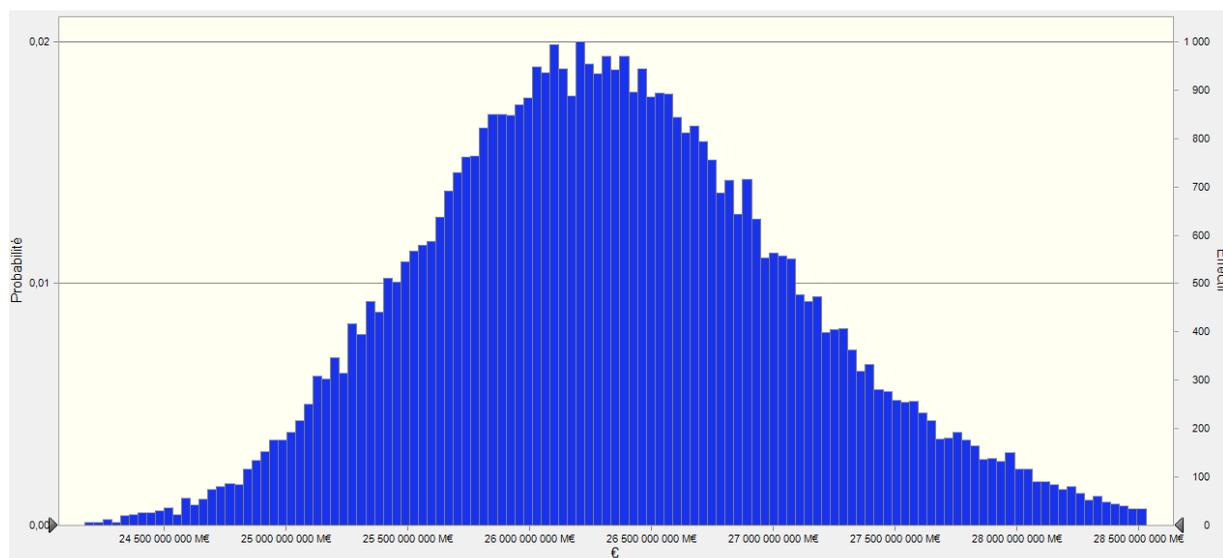
La figure suivante illustre l'évaluation des coûts d'investissement de la tranche 1 en intégrant les incertitudes d'estimation, les risques et les opportunités. Cette illustration est réalisée avec une simulation de Monte-Carlo de 50 000 tirages² sur la base des hypothèses retenues par l'Andra pour l'évaluation des coûts.



- L'évaluation des autres coûts d'investissement (alvéoles de stockage supplémentaires à construire sur les tranches ultérieures, jouvence des équipements, démantèlement...) est liée aux hypothèses retenues concernant l'inventaire total des déchets à stocker et à la durée de fonctionnement du centre jusqu'à sa mise à l'arrêt définitif. L'évaluation des coûts d'exploitation et l'évaluation de la fiscalité sont également liées à la durée de fonctionnement du centre.

La figure suivante illustre l'évaluation de ces coûts sur une durée cumulée de plus de 100 ans. Cette illustration est réalisée avec une simulation de Monte-Carlo de 50 000 tirages sur la base des hypothèses retenues par l'Andra pour l'évaluation des coûts.

² Pour chaque tirage, le modèle considère de manière aléatoire la réalisation d'un ensemble d'opportunités et de risques et quantifie l'évaluation des coûts associée.



- L'Andra a également réalisé une évaluation des activités support (en particulier la R&D et les essais technologiques) sur la période 2012-2034. Cette évaluation couvre les différentes actions menées en vue de l'instruction de la demande d'autorisation de création de Cigéo, la préparation de la mise en service et de la phase industrielle pilote ainsi que les actions nécessaires pour confirmer certaines opportunités à l'étude. Le budget correspondant est estimé à 680 M€ sur la période 2012-2018, 540 M€ sur la période 2019-2024 et 525 M€ sur la période 2025-2034. Les actions correspondantes sont décrites dans le plan de développement qui est joint à la présente évaluation des coûts.

4.4 Mises à jour de l'évaluation des coûts

L'Andra s'est attachée à mettre en œuvre une méthodologie robuste d'évaluation des coûts utilisant les meilleures pratiques des grands projets industriels et un audit en continu des méthodes et outils.

L'objectif visé par l'Andra au stade des études techniques préliminaires (esquisse) du projet Cigéo était un niveau de précision de l'ordre -20/+40 %, selon les classes d'estimation et niveaux de précision classiquement associés à ce niveau d'études. Les simulations réalisées pour intégrer les incertitudes d'estimation, les risques et les opportunités montrent que l'évaluation des coûts réalisée se situe à l'intérieur de la fourchette visée.

L'Andra mettra à jour son évaluation suite aux études d'avant-projet qui permettront de préciser l'évaluation des coûts, en particulier sur le périmètre du premier investissement (tranche 1).

CHIFFRAGE CIGÉO EN PHASE ESQUISSE

Hypothèses économiques et calendaires

Identification

CG.TE.F.NTE.AMOA.EEE.0000.14.0059/B

Octobre 2014

Pages : **13**

SOMMAIRE

1. Objet du document	5
2. Hypothèses générales	5
2.1 <i>Périmètre</i>	5
2.2 <i>Répartition des dépenses</i>	5
2.3 <i>Inventaire de déchets</i>	5
2.4 <i>Chroniques de mise en stockage des déchets</i>	5
2.5 <i>Hypothèses sur le scénario de fermeture</i>	6
2.6 <i>Actualisation financière</i>	6
2.7 <i>Indices</i>	7
3. Hypothèses spécifiques	8
3.1 <i>Investissement pour la tranche 1</i>	8
3.1.1 Travaux de réalisation (sous réserve des autorisations)	8
3.1.2 Missions de maîtrise d'œuvre	9
3.2 <i>Autres tranches de construction</i>	9
3.3 <i>Fermeture et démantèlement</i>	9
3.4 <i>Jouvence</i>	10
3.5 <i>Exploitation</i>	10
4. Périodicités de jouvence	11
Annexe : Logique de déroulement du projet Cigéo	12

TABLES DES ILLUSTRATIONS

Figures

Figure 1 – Chronique de livraison des déchets retenue pour le chiffrage	6
Figure 2 – Périodicités de jouvence (bâtiments conventionnels)	11
Figure 3 – Logique de déroulement du projet Cigéo	12

Tableaux

Tableau 1 - Chroniques de stockage retenues pour le chiffrage	6
Tableau 2 -Indices pour la mise à jour des conditions économiques	7
Tableau 3 - Calendrier des travaux de réalisation	8
Tableau 4 - Calendrier des tâches de MOe	9
Tableau 5 - Calendrier de fermeture et de démantèlement	10
Tableau 6 - Grandes périodes d'exploitation	10
Tableau 7 - Rythmes de jouvence par matériel	11

1. Objet du document

Ce document a pour objet de présenter les hypothèses économiques et calendaires simplifiées retenues pour la répartition temporelle des dépenses du chiffrage Cigéo en phase esquisse dans sa version actualisée suite aux évolutions suivantes :

- Prise en compte du nouveau planning objectif intégrant les suites données au débat public sur le projet Cigéo (cf. JORF n°0108 du 10 mai 2014, page 7851, texte n° 8) ;
- Prise en compte de la solution d'ensemble retenue au jalon J_{aps} 03b des marchés de MOe-SS intégrant les différentes voies d'optimisation, les études en sensibilité et les sujets d'études retenus lors de la première phase des études d'APS ;
- Intégration du Programme Industriel de Gestion des Déchets (PIGD) version D.

La chronique de dépenses permet l'établissement du coût actualisé du projet qui est de la responsabilité des producteurs de déchets.

2. Hypothèses générales

2.1 Périmètre

L'évaluation des coûts est réalisée à partir de 2012 (début de la conception industrielle) et inclut les dépenses déjà réalisées depuis cette date.

Les coûts sont restitués hors taxe sur la valeur ajoutée.

Les activités sous maîtrise d'ouvrage des producteurs (conditionnement et entreposage des déchets, transport jusqu'au centre de stockage) ainsi que les taxes additionnelles INB liées à l'accompagnement économique ne sont pas intégrées dans le périmètre de l'évaluation des coûts réalisée par l'Andra.

2.2 Répartition des dépenses

Au stade actuel des études, l'échéancier des dépenses est simplifié du fait d'une organisation des chantiers de construction qui ne sera définie que dans les phases ultérieures du projet.

En particulier :

- Les dépenses sont présentées année par année ;
- Les dépenses pluriannuelles sont réparties au prorata du nombre de jours total par année, sans prise en compte du rythme de travail.
- L'échéancier ne préjuge pas du positionnement des termes de paiement contractuels ni de l'anticipation de financement nécessaire vis-à-vis de la trésorerie ;

Enfin, les coûts sont restitués hors taxe sur la valeur ajoutée.

2.3 Inventaire de déchets

Le chiffrage est fondé sur l'inventaire quantitatif du scénario industriel défini par les producteurs de déchets dans le Programme Industriel de Gestion des Déchets (PIGD) version D. Le volume de déchets pris en compte est le suivant :

- MA-VL : 73 600 m³ ;
- HA : 10 100 m³.

Il est à noter que cet inventaire a évolué par rapport aux hypothèses retenues pour l'évaluation des coûts en 2005 (scénario industriel 2005 : 59 300 m³ pour les MA-VL ; 6 690 m³ pour les HA), en lien notamment avec les hypothèses relatives à la durée d'exploitation des installations.

2.4 Chroniques de mise en stockage des déchets

Le chiffrage est fondé sur la chronique de référence définie dans le PIGD version D, avec un décalage pour prendre en compte les adaptations du calendrier suite au débat public. Le décalage retenu est ainsi de 4 ans.

Les dates structurantes associées sont les suivantes :

Jalon	Date
Début des essais de qualification opérationnelle	2025
Mise en service industriel	fin 2028
Début du stockage des déchets MAVL	début 2029
Début du stockage des déchets HA0	début 2030
Fin de l'exploitation de la tranche 1	fin 2034
Fin du stockage des déchets HA0	fin 2039
Début du stockage des déchets HA1/2	début 2079
Fin du stockage des déchets MAVL	fin 2099
Fin du stockage des déchets HA1/2	fin 2144
Fin de la fermeture et du démantèlement du centre	fin 2156

Tableau 1 - Chroniques de stockage retenues pour le chiffrage

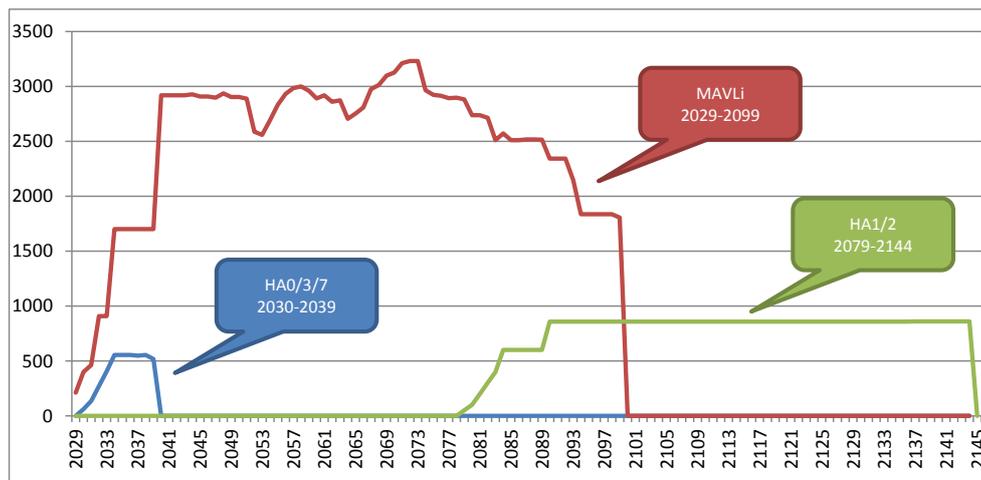


Figure 1 - Chronique de livraison des déchets retenue pour le chiffrage

2.5 Hypothèses sur le scénario de fermeture

Le scénario de fermeture retenu est fondé sur les hypothèses suivantes :

- Fermeture de la zone de stockage HA0 sur 5 ans, 10 ans après la fin d'exploitation ;
- Fermeture des alvéoles MAVL en moyenne 10 ans après la fin de leur exploitation ;
- Fermeture de la zone de stockage MAVL sur 10 ans, à l'issue de la fermeture de la dernière alvéole MAVL ;
- Fermeture des alvéoles HA1/2 d'un quartier de stockage sur 4 ans, à l'issue de l'exploitation de l'ensemble du quartier ;
- Fermeture des galeries d'accès et des galeries de liaison HA1/2 sur 4 ans, à l'issue de la fermeture de l'ensemble des alvéoles HA1/2 ;
- Fermeture de la zone de soutien logistique et des liaisons surface - fond sur 4 ans, à l'issue de la fermeture de la zone de stockage HA1/2.

Ces hypothèses ne préjugent pas du schéma directeur d'exploitation et de fermeture qui sera retenu en référence lors de la demande d'autorisation de création de Cigéo.

2.6 Actualisation financière

L'actualisation financière est du ressort des producteurs de déchets dans le cadre de l'évaluation de leurs provisions pour charge de long terme.

Le chiffrage Andra est présenté est coûts bruts non actualisés. L'estimation Andra est réalisée en date de valeur janvier 2012.

2.7 Indices

Les indices utilisés pour la mise à jour des conditions économiques, en fonction des différents sous-systèmes sont présentés dans le tableau suivant :

Postes	Indices	Sous-systèmes
Etudes	Index Ingénierie ING, publié au Moniteur (indice contractuel)	SS8
Terrassements généraux	TP03 : terrassements généraux	SS3 / SS5
VRD / merlonnage	BT02 : terrassements bâtiment	SS2
VRD	Indice composite : 20% TP08 (Routes et aérodromes avec fournitures) + 30% TP10a (Canalisations, égouts, assainissement et adduction d'eau avec fournitures de tuyaux) + 50% TP01 (travaux publics tous corps d'état)	SS3 / SS5
Verses / Terminal ferroviaire	TP01	SS3 / SS5
Gros œuvre / second œuvre (y compris frais de chantier)	BT01 : bâtiment tous corps d'état Frais de chantier SS3 : ICHT-F (coût horaire du travail dans la construction)	SS2 / SS3 / SS5 SS4 pour les ouvrages de surface
Génie civil puits	TP05a : Travaux en souterrain traditionnels	SS4 uniquement
Génie civil galeries tunnelier (descenderies et galeries MAVL)	TP05b : Travaux en souterrain au tunnelier	SS4 uniquement
Génie civil galeries MAP (ZSL, alvéoles MAVL, galeries HA)	TP05a : Travaux en souterrain traditionnels	SS4 uniquement
Génie civil micro-tunnelier (alvéoles HA)	TP05a : Travaux en souterrain au tunnelier	SS4 uniquement
Mécanique	70% x ICHTrev-TS IME + 30% x Profilés en aciers non alliés de qualité - F241003	SS1 / SS2 / SS4 / SS8
Electricité	BT47 : électricité (bâtiment)	SS2 / SS4
Conduite Observation/surveillance	PRIVEN 262700 (Produits informatiques, électroniques et optiques, équipements électriques)	SS2 / SS4
Ventilation	BT41 : ventilation et conditionnement d'air (bâtiment)	SS2 / SS4
Tuyauterie	BT38 : plomberie (bâtiment)	SS2
Fluides et utilités	TP10a	SS3 / SS5
Energies	TP12 (réseaux d'électrification)	SS3 / SS5
Système d'information industriel	PRIVEN 262700 (Produits informatiques, électroniques et optiques, équipements électriques)	SS3 / SS5
Effectifs	ICHTrev-TS-IME	Exploitation
Budget de fonctionnement	Indice des prix à la consommation	
Energies et fluides	TP10a et TP12	
Pièces de rechange (pièces mécaniques prépondérantes)	70% x ICHTrev-TS IME + 30% x Profilés en aciers non alliés de qualité - F241003	
Conteneurs de stockage	Indice INSEE 001653393 (Produits sidérurgiques en acier alié)	

Tableau 2 -Indices pour la mise à jour des conditions économiques

3. Hypothèses spécifiques

3.1 Investissement pour la tranche 1

La chronique d'investissement de la tranche 1 est bâtie en cohérence avec le planning du projet décomposé selon l'organigramme des tâches. Ce planning est fondé sur l'hypothèse de l'obtention du décret DAC fin 2020. Les dépenses sont comptabilisées à partir de janvier 2012 correspondant au début de la phase esquisse.

Les coûts d'étude et de réalisation de la tranche 1 sont répartis en dépenses moyennes sur la durée de chacune des tâches, à l'exception des dépenses portées au PMT (2013-2018) qui sont réparties spécifiquement.

3.1.1 Travaux de réalisation (sous réserve des autorisations)

Tâches de réalisation		Date de début	Date de fin
Aménagements préliminaires (y/c travaux préparatoires)		Avr.-2017	Oct.-2021
SS1 - Process Nucléaire			
	Equipements de surface	Juil.-2023	Juin.-2026
	Equipements communs de fond	Sept.-2024	Nov.-2026
	Process MAVL	Sept.-2025	Oct.-2026
	Process HA	Fév.-2026	Juil.-2027
SS2 - Installations nucléaires de surface		Juil.-2021	Juin.-2026
SS3 - Installations conventionnelles de surface		Juil.-2021	Juin.-2026
SS4 - Ouvrages de liaison LSF et souterrains			
	Descenderies (creusement, GC, équipements)	Janv.-2021	Août-2026
	Puits	Janv.-2021	Sept.-2026
	Zone de soutien logistique	Juil.-2022	Sept.-2026
	Ouvrages MAVL		
	Galeries de liaison MAVL (y/c locaux techniques, recoupes et galeries de retour d'air)	Juin-2023	Janv.-2027
	Alvéoles MAVL	Juin-2023	Déc.-2026
	Ouvrages HA		
	Galeries de liaison HA0	Juin-2023	Mai-2026
	Galeries d'accès HA0	Déc.-2023	Avr.-2027
	Alvéoles HA0	Avr.-2026	Août-2028
SS5 - Installations communes		Juil.-2021	Juin.-2026
SS7 - Conteneurs de stockage			
	Fabrication et appros conteneurs T1	Janv.-2023	Déc.-2028
SS8 - Transferts inclinés			
	Reprise APD et études d'exécution, qualification	Janv.-2019	Mars-2022
	Appros / Fabrication / Essais usine	Avr.-2022	Mars-2023
	Montage / Essais site	Janv.-2023	Déc.-2025
Qualification opérationnelle et essais composants		Janv.-2025	Déc.-2027
Essais d'ensemble en actif		Janv.-2028	Déc.-2028
Phase industrielle pilote		Janv.-2025	Déc.-2034

Tableau 3 - Calendrier des travaux de réalisation

Ce calendrier sera complété ultérieurement avec les autres aménagements hors site à réaliser (desserte ferroviaire, desserte routière, autres utilités...).

3.1.2 Missions de maîtrise d'œuvre

Les missions de maîtrise d'œuvre de conception (esquisse, APS, APD et dossiers réglementaires) font partie intégrante du coût global de possession. Elles sont couvertes par le PMT 2013-2018.

Les missions de maîtrise d'œuvre suivantes (PRO, ACT, VISA et suivi de réalisation) se déroulent globalement à partir de 2019, à l'exception :

- des aménagements préliminaires pilotés par la maîtrise d'œuvre système (2017-2019) ;
- des missions de maîtrise d'œuvre nécessaires à l'appel d'offres (PRO/ACT) pour les entreprises de réalisation de l'infrastructure travaux en souterrain (descenderies, puits travaux, zone de soutien logistique travaux et galerie de liaison MAVL) (2018-2020) ;
- de la phase d'approvisionnement des moyens de creusement (2019-2020).

A ce jour, les missions de maîtrise d'œuvre sont réparties par sous-système. Cette répartition ne préjuge pas de l'organisation industrielle future qui sera mise en œuvre pour la réalisation du centre de stockage.

Tâches de maîtrise d'œuvre	Date de début	Date de fin
Aménagements préliminaires (y/c travaux préparatoires)	Mars-2017	Déc.-2021
SS1 - Process Nucléaire	Juil.-2018	Déc.-2028
SS2 - Installations nucléaires de surface	Juil.-2018	Déc.-2028
SS3 - Installations conventionnelles de surface SS5 - Installations communes	Juil.-2018	Déc.-2028
SS4 - Liaisons surface-fond et ouvrages souterrains	Mars-2018	Déc.-2028
SS8 - Transferts inclinés	Janv.-2019	Déc.-2028

Tableau 4 - Calendrier des tâches de MOe

3.2 Autres tranches de construction

Les coûts de construction post-Tranche 1 sont répartis de manière simplifiée :

- Les coûts de maîtrise d'œuvre et de maîtrise d'ouvrage sont comptabilisés de manière concomitante aux coûts matériels et travaux sans prendre en compte l'anticipation des études ;
- Les coûts de travaux souterrains des zones de stockage et du process nucléaire associé sont répartis en valeur moyenne entre la date de début de stockage et la date de fin de stockage pour chaque catégorie de déchet ;
- Les coûts de construction du bâtiment EP2 (bâtiment nucléaire de surface dédié aux déchets HA fortement exothermiques) sont répartis en valeur moyenne sur 10 ans avant le début de prise en charge des déchets HA1/2 ;
- Les coûts communs et transverses sont répartis en valeur moyenne entre la date de fin de l'exploitation de la Tranche 1 et la fin du démantèlement et fermeture du centre de stockage.

A ce stade des études, cette simplification apparaît valide étant donné les évolutions possibles de la chronique de livraison des déchets. La répartition en moyenne ne préjuge pas de l'organisation industrielle des futures tranches (ampleur des futurs chantiers) ni du planning détaillé de mise à disposition des ouvrages de stockage pour l'exploitation.

3.3 Fermeture et démantèlement

Comme pour les coûts de construction post-Tranche 1, les coûts de fermeture et démantèlement sont répartis de manière simplifiée en tenant compte du scénario de fermeture retenu en hypothèse pour le chiffrage en phase esquisse.

Les coûts de maîtrise d'œuvre et de maîtrise d'ouvrage sont comptabilisés de manière concomitante aux coûts matériels et travaux sans prendre en compte l'anticipation des études.

Concernant les coûts de fermeture des ouvrages souterrains et de démantèlement du process nucléaire associé, ceux-ci sont établis selon les hypothèses présentées au paragraphe 2.5.

Ouvrages / Equipements	Hypothèses	Dates selon PIGD v.D ¹
HA0	Répartition en valeur moyenne sur 5 ans, 10 ans après la fin d'exploitation de la zone de stockage.	2050 - 2054
Alvéoles MAVL	Répartition en valeur moyenne à partir de 10 ans après le début d'exploitation et jusqu'à 10 ans après la fin d'exploitation.	2039 - 2109
Liaison MAVL	Répartition en valeur moyenne sur 10 ans à partir de la fin de la fermeture des alvéoles MAVL.	2110 - 2119
Alvéoles HA1/2	Répartition en valeur moyenne à partir de la fin d'exploitation du premier quartier (soit 12 ans après le début d'exploitation correspondant à 6 quartiers en 66 ans) et jusqu'à 4 ans après la fin d'exploitation des déchets HA1/2.	2091 - 2148
Accès et liaison HA1/2	Répartition en valeur moyenne à partir de la fin de la fermeture des alvéoles HA1/2 sur une durée de 4 ans.	2149 - 2152
Zone de soutien logistique et liaisons surface fond	Répartition en valeur moyenne à partir de la fin de la fermeture de la zone HA1/2 sur une durée de 4 ans.	2153 - 2156

Tableau 5 - Calendrier de fermeture et de démantèlement

Les coûts de démantèlement du bâtiment EP1 (installation nucléaire de surface construite lors de la Tranche 1) sont répartis en valeur moyenne sur 10 ans à l'issue de sa fin d'exploitation. Les coûts de déconstruction des installations de surface et des communs et transverses sont répartis en valeur moyenne à partir de la fin du stockage jusqu'à la fin de la fermeture et du démantèlement du centre.

3.4 Jouvence

La jouvence correspond au renouvellement à l'identique d'un ouvrage ou d'un équipement en fin de vie. Les coûts de jouvence sont calculés sur la base :

- D'une durée de vie prévisionnelle des différents composants du stockage ;
- D'une date de mise en service ;
- D'une date de fin d'exploitation.

L'estimation est détaillée par corps de métier et par année (piquets de jouvence).

Dans le cadre de la présentation du chiffrage, les résultats du calcul sont conservés mais leur répartition temporelle est simplifiée.

Les coûts sont répartis en valeur moyenne sur la durée d'exploitation, en neutralisant les 15 premières années et les 5 dernières années. A ce stade des études, cette simplification apparaît valide étant donné les évolutions possibles de certaines des données d'entrée (chroniques de stockage, scénario de fermeture) et la latitude dans l'organisation des futurs projets de jouvence (possibilité de regrouper certaines opérations). Cette simplification ne modifie pas le coût brut.

3.5 Exploitation

Les coûts d'exploitation du centre de stockage sont répartis en fonction des périodes d'exploitation issues de l'analyse de la chronique du PIGD version D. Les périodes d'exploitation, définies dans la note de chiffrage relative aux coûts d'exploitation sont les suivantes :

Périodes	2029-2033	2034-2051	2052-2074	2075-2089	2090-2099	2100-2144	Total
Durée (années)	5	18	23	15	10	45	116

Tableau 6 - Grandes périodes d'exploitation

La phase de mise en place des équipes d'exploitation est programmée sur la période 2023-2029.

¹ Les périodes indiquées sont comptabilisées en années pleines.

4. Périodicités de jouvence

Ces périodicités ont fait l'objet d'ajustements dans l'optique d'une cohérence avec le scénario d'exploitation issu du PIGD version D. Ces ajustements ont permis de limiter le nombre prévisionnel de jouvences. Ainsi, les bâtiments conventionnels construits lors de la Tranche 1 sont reconstruits à neuf après 60 ans d'exploitation. Le second œuvre (façades, couverture...) est jouvencé (« ravalement ») une fois à mi vie (30 ans), tandis que les lots techniques avec une durée de vie prévisionnelle de 20 ans (contrôle d'accès, distribution informatique, éclairage...) font l'objet de 2 jouvences comme l'illustre le schéma ci-après.

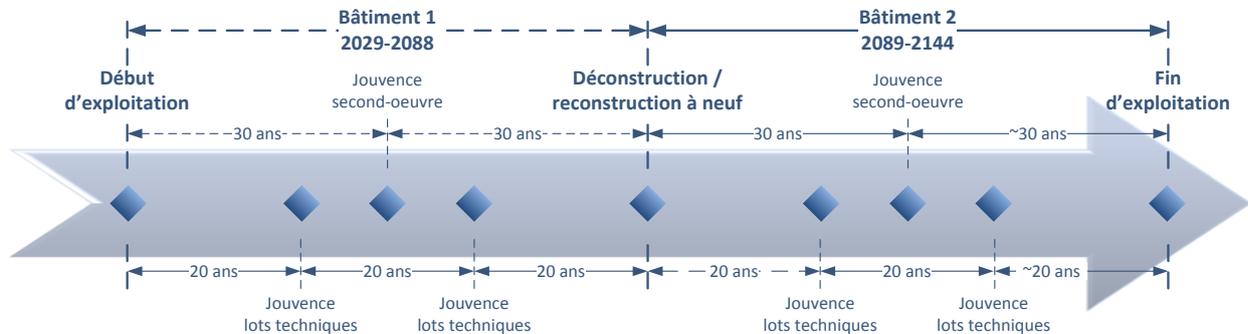


Figure 2 - Périodicités de jouvence (bâtiments conventionnels)

Certaines durées sont considérées comme optimistes en l'état actuel du retour d'expérience et devront être consolidées dans les phases ultérieures du projet.

Type de matériel	Rythme de jouvence (années)
Équipement mécanique spécial	60
Manutention	65
Manutention dans bâtiments conventionnels	50
Équipements utilités / lots techniques	20
Réseaux utilités / lots techniques	50
Ascenseurs fond	60
Portes métalliques et coupe-feu	25
Transfo HT	50
Transfo BT	30
Équipements Electriques HT	25
Équipements Electriques BT	20
Câbles HT	50
Câbles BT	60
Câbles BT dans bâtiments conventionnels	40
Systèmes informatiques	20

Type de matériel	Rythme de jouvence (années)
Ventilation nucléaire équipements	30
Gaines tôlees nucléaires	30
Ventilation chantier fond équipements	40
Bâtiments conventionnels	60
Façades bardées / Etanchéité de couverture	30
Second œuvre conventionnel	30
Second œuvre nucléaire	60
Roulement	40
Voiries	60
Réseaux à proximité des bâtiments nucléaires	60
Voiries et réseaux à proximité des bâtiments conventionnels	60
Réseaux gravitaires humides (VRD)	50
Autre divers (VRD)	40
Mobilier	15

Tableau 7 - Rythmes de jouvence par matériel

Annexe : Logique de déroulement du projet Cigéo

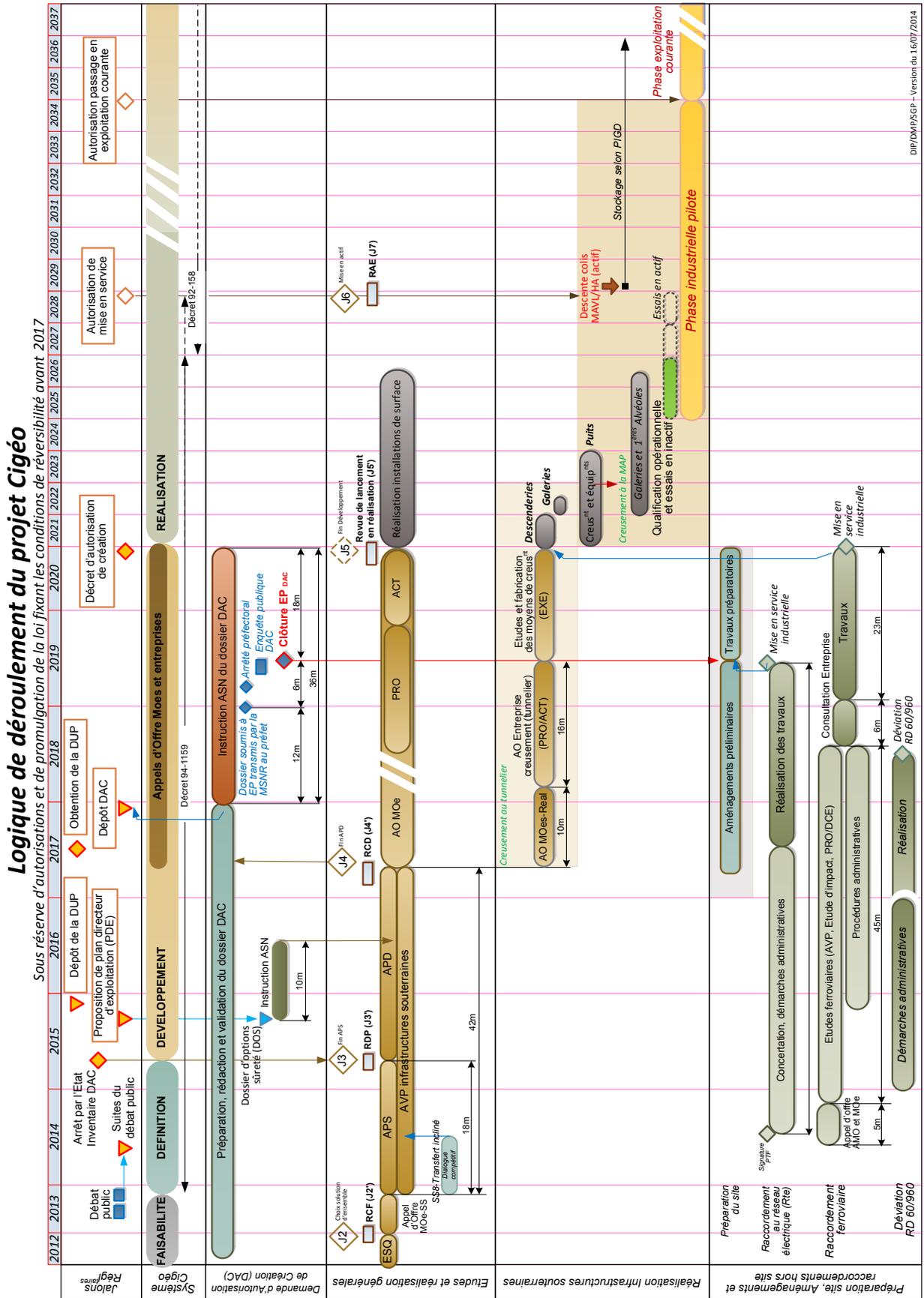


Figure 3 - Logique de déroulement du projet Cigéo

CHIFFRAGE CIGÉO EN PHASE ESQUISSE

Estimation du coût de base

Process nucléaire (SS1)

Identification

CG.TE.F.NTE.AMOA.EEE.1000.14.0060/B

Octobre 2014

Pages : **24**

SOMMAIRE

1.	Objet du document	5
2.	Conception et dimensionnement des équipements	5
2.1	<i>Principes de conception</i>	5
2.2	<i>Description des équipements</i>	6
2.2.1	Equipements du process surface et du process commun HA/MAVL fond	6
2.2.2	Equipements MAVL (hottes et manutention en alvéole)	7
2.2.3	Equipements HA (hottes et manutention en alvéole)	9
2.3	<i>Liste des équipements</i>	10
2.3.1	Process « Fond commun »	10
2.3.2	Process « Fond HA »	10
2.3.3	Process « MAVL »	13
2.3.4	Process « Surface »	16
3.	Méthodologie de chiffrage	18
3.1	<i>Investissement initial</i>	18
3.2	<i>Maîtrise d'œuvre, maîtrise d'ouvrage et AMO réglementaires</i>	19
3.3	<i>Démantèlement</i>	19
3.4	<i>Jouvence</i>	19
3.5	<i>Pièces de rechange</i>	19
4.	Estimation du coût de base	19
4.1	<i>Périmètre et limites de prestations</i>	20
4.2	<i>Investissement de la Tranche 1</i>	20
4.3	<i>Autres tranches de construction</i>	21
4.4	<i>Jouvence</i>	21
4.5	<i>Démantèlement</i>	22
4.6	<i>Pièces de rechange</i>	22
4.7	<i>Synthèse des investissements</i>	22
4.8	<i>Analyse des écarts entre Jesq05 et Japs03b</i>	23
4.9	<i>Chronique de dépenses</i>	23

TABLES DES ILLUSTRATIONS

Figures

Figure 1 - Synoptique général du process nucléaire (SS1)	5
Figure 2 - Machine à levage limité	6
Figure 3 - Accostage et parc à hottes	6
Figure 4 - Chariot automoteur et table tournante	7
Figure 5 - Navette d'accostage MAVL et navette d'accostage HA	7
Figure 6 - Hotte MAVL	7
Figure 7 - Alvéole de stockage MAVL : Pont gerbeur	8
Figure 8 - Cellule de manutention colis passages de fourches	8
Figure 9 - Hotte HA9	
Figure 10 - Synoptique de mise en stockage des colis HA	9
Figure 11 - Chronogramme des dépenses pour le coût de base	23

Tableaux

Tableau 1 - Liste des équipements du process « Fond commun »	10
Tableau 2 - Liste des équipements du process « Fond HA »	13
Tableau 3 - Liste des équipements du process « MAVL »	16
Tableau 4 - Liste des équipements du process « Surface »	17
Tableau 5 - Taux de MOe, MOA et AMO réglementaires	19
Tableau 6 - Ratios appliqués par nature de poste pour les pièces de rechange	19
Tableau 7 - Décomposition du coût d'investissement du process nucléaire en tranche 1	20
Tableau 8 - Décomposition du coût d'investissement du process nucléaire pour les tranches ultérieures	21
Tableau 9 - Décomposition des coûts de jouvence du process nucléaire	21
Tableau 10 - Décomposition du coût de démantèlement du process nucléaire	22
Tableau 11 - Tableau de synthèse des coûts de pièces de rechange	22
Tableau 12 - Tableau de synthèse des coûts d'investissement	22
Tableau 13 - Analyse des écarts	23

1. Objet du document

Ce document a pour objet de présenter le chiffrage du coût de base d'investissement des équipements du process nucléaire constituant le sous-système 1 (SS1).

La mise à jour de cette note s'inscrit dans le cadre du processus d'optimisation de la première phase d'études d'Avant-Projet Sommaire (APS) aboutissant au choix d'une solution d'ensemble servant de référence pour la constitution du dossier d'APS (jalón J_{APS}03b des contrats de Maîtrises d'Œuvre Sous-Systèmes - MOe-SS).

Le périmètre du SS1 couvre les fonctions suivantes :

- L'accostage des hottes en surface et la gestion du parc de hottes ;
- Le transfert des colis de déchets entre les installations de surface et les zones de stockage au fond (hors liaison jour/fond SS8) comprenant les engins de transfert et les voies de roulement associé en galerie ;
- La mise en stockage des colis MAVL ;
- La mise en stockage des colis HA0 et HA1/2 ;
- Le retrait éventuel de colis dans le cadre des exigences liées à la réversibilité/récupérabilité.



Figure 1 - Synoptique général du process nucléaire (SS1)

Pour assurer ces fonctions, le process nucléaire est composé des systèmes suivants :

- Hottes blindées pour le transfert des colis ;
- Moyens de transfert des hottes et voies de roulement associées ;
- Moyens de manutention en alvéole des colis de stockage pour leur mise en place et leur retrait éventuel.

2. Conception et dimensionnement des équipements

2.1 Principes de conception

Les principaux objectifs de conception du process nucléaire sont liés à la sûreté et à la maîtrise des risques de choc, de collision, de chute, ainsi que les risques d'incendies pendant les phases de transfert tout en respectant les objectifs de flux.

Le système doit assurer le maintien de l'intégrité des colis de stockage dans toutes les situations de fonctionnement dégradé. Le système doit également limiter l'exposition externe du personnel d'exploitation, de maintenance et d'intervention à un niveau aussi bas que raisonnablement possible (principe ALARA), ce qui implique la mise en œuvre de hottes blindées pour les transferts en galerie de liaison.

Par ailleurs, le système est fondé sur les principes opérationnels usuels : fiabilité (préférence pour des technologies éprouvées, simple et robustes), maintenabilité (mise à disposition de locaux et d'équipements de maintenance, accessibilité des équipements à maintenir ou nucléarisation en vue d'une maintenance télé-opérée) et disponibilité (redondance des composants, voire des équipements, surveillance et maintenance préventive) et durabilité des concepts dans le temps (minimisation des jouvences).

Enfin, la fonction liée au retrait éventuel des colis se traduit par la prise en compte dans le chiffrage de Cigéo de mesures conservatoires dans les cellules de manutention MA-VL par exemple, pour permettre

l'installation d'un équipement de contrôle de non contamination des colis. Il est fait l'hypothèse ici que l'opération de retrait ne nécessiterait pas de modification des moyens de manutention utilisés pour la mise en stockage. Ces phases nécessiteraient cependant une adaptation des règles générales d'exploitation RGE et des modes opératoires associés.

2.2 Description des équipements

2.2.1 Equipements du process surface et du process commun HA/MAVL fond

En surface la manutention et le transfert des hottes est assurée par une machine à levage limité complétée par un transbordeur de chargement/déchargement du funiculaire. Cette machine à levage limité assure la gestion du parc à hotte et l'ensemble des transferts vers les accostages. Le positionnement final des hottes sur les façades d'accostage, interfaces entre SS1 et SS2 est réalisé avec des tables d'accostages adaptées aux niveaux de précision requis pour le bon positionnement de la hotte afin d'assurer le niveau de confinement nécessaire imposé par les classes de confinement des locaux périphériques.

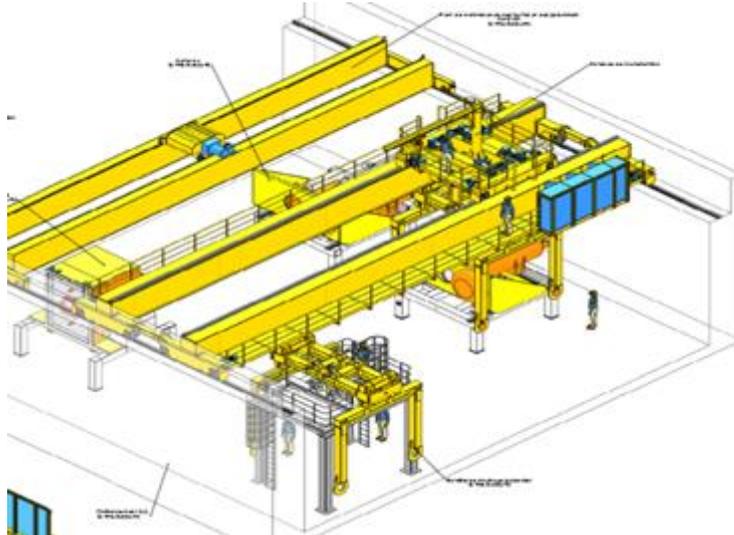


Figure 2 - Machine à levage limité



Figure 3 - Accostage et parc à hottes

Après le transfert par le funiculaire dans l'installation souterraine, le transfert des hottes en galerie de liaison est effectué par un chariot automoteur électrique sur rails et par des navettes en galeries d'accès, avec changements de direction et orientation des hottes par tables tournantes.

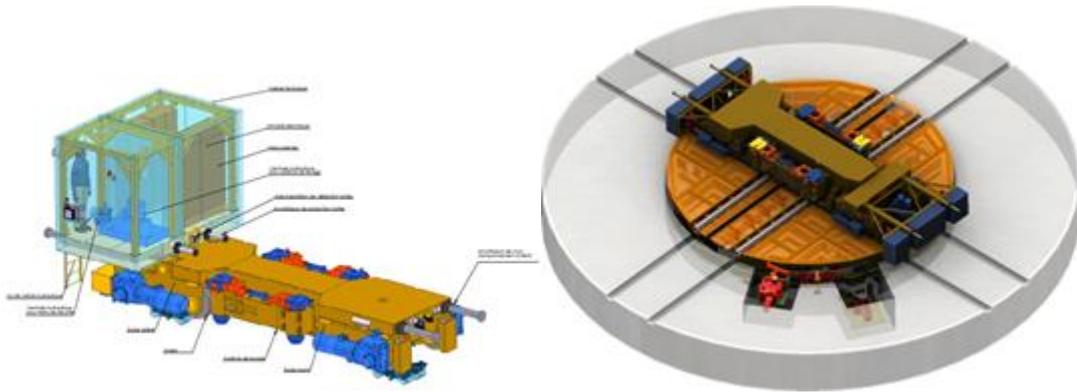


Figure 4 - Chariot automoteur et table tournante

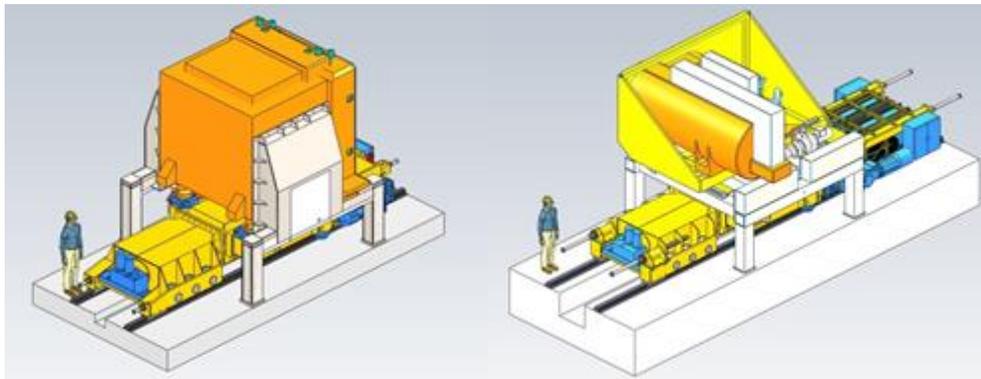


Figure 5 - Navette d'accostage MAVL et navette d'accostage HA

2.2.2 Equipements MAVL (hottes et manutention en alvéole)

Les études retiennent un principe de mutualisation des hottes MAVL qui conduit en base à 3 hottes différentes pour gérer l'ensemble des colis MAVL, et par conséquent 3 accostages de géométries différentes en surface.

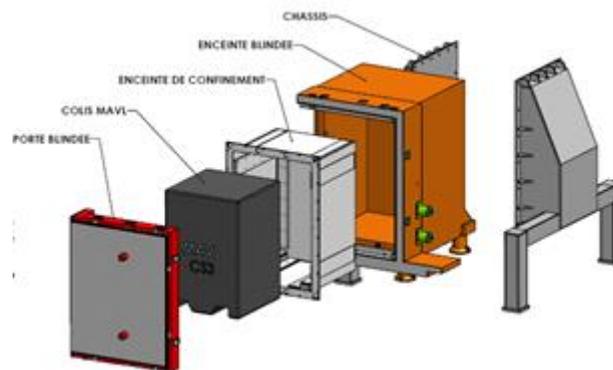


Figure 6 - Hotte MAVL

Pour la mise en position de stockage des colis MAVL, deux systèmes de manutention sont mis en œuvre, en fonction du gabarit et de la masse unitaire des colis de stockage :

- Pont gerbeur pour les colis avec passages de fourches, colis CS1 à CS5 ;
- Chariot porteur pour des colis CS6 et CS7 en alvéole mono colis.

Le principe général de mise en stockage est similaire pour les deux concept : accostage de la hotte à la cellule de manutention, extraction du colis et mise en place sur un poste de reprise, prise en charge par le moyen de transfert, puis transfert du colis dans l'alvéole avec le pont gerbeur ou le chariot porteur et enfin mise en position définitive de stockage.

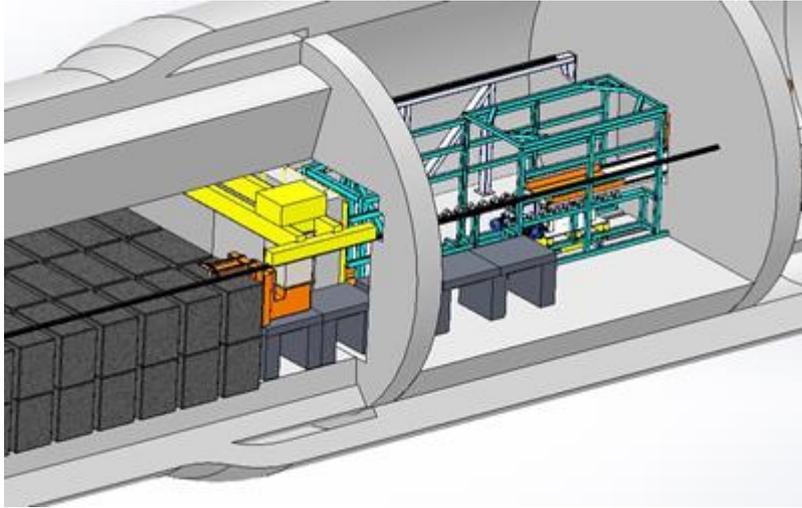


Figure 7 - Alvéole de stockage MAVL : Pont gerbeur

Les alvéoles avec pont gerbeur sont les plus nombreuses. Le chariot porteur est limité aux colis CS6 et CS7, de masse plus importante, qui présentent un inventaire limité. Pour le concept de type pont gerbeur, le colis est pris en charge dans la hotte par une table de déchargement qui effectue le transfert du colis de la façade d'accostage à une table élévatrice de mise à niveau du colis en fonction de la couche de stockage en cours de constitution. Après introduction dans la cellule de manutention, un contrôle du colis par caméra embarquée est effectué. Le pont gerbeur est chargé du transfert du colis de la table élévatrice mise à niveau jusqu'à sa mise en place en alvéole.

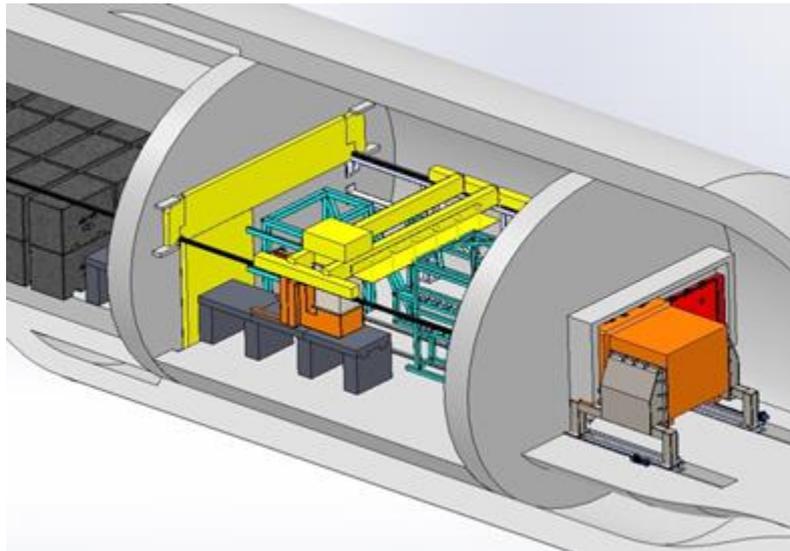


Figure 8 - Cellule de manutention colis passages de fourches

2.2.3 Equipements HA (hottes et manutention en alvéole)

Les colis HA sont transportés dans des hottes blindées en position horizontale prêts à être déchargés en tête d'alvéole HA.

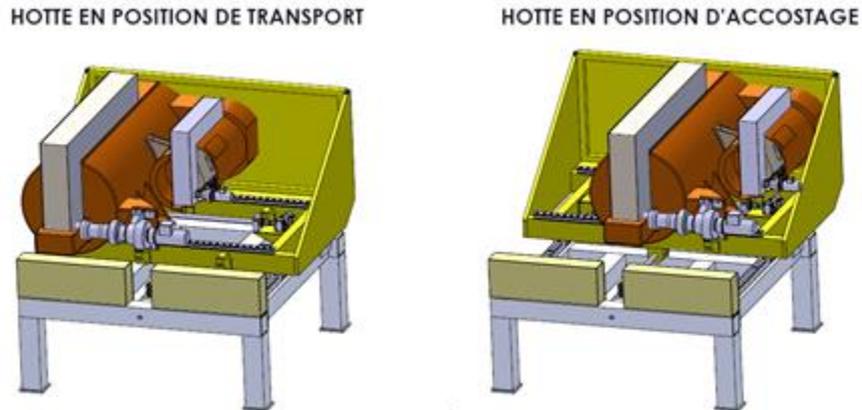


Figure 9 - Hottes HA

Le colis est d'abord introduit dans l'alvéole par la hotte de transfert puis, un second équipement « robot pousseur » vient mettre en position définitive le colis.

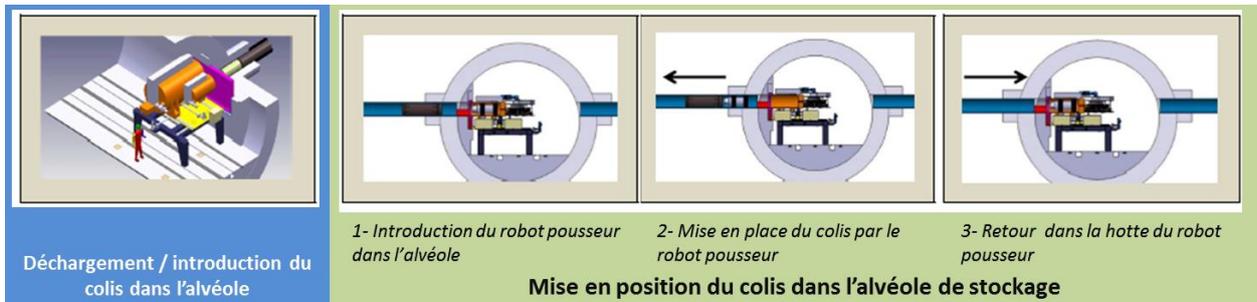


Figure 10 - Synoptique de mise en stockage des colis HA

De ce fait, contrairement aux hottes MAVL passives, la hotte de transfert HA est dotée de deux chaînes. La première chaîne permet de retirer puis remettre le bouchon d'exploitation en tête d'alvéole pour libérer l'accès du colis. Celui-ci est pris en charge par une seconde chaîne qui assure le déplacement du colis de quelques mètres depuis son logement dans la hotte vers la tête de l'alvéole. Les intercalaires suivent le même processus.

Le système du robot pousseur consiste à pousser un colis ou un intercalaire par glissement sur le chemisage de l'alvéole sur une centaine de mètres. La poussée sur le premier colis est exercée par un vérin axial. La reprise de l'effort de poussée est réalisée par des vérins radiaux qui s'appuient sur le chemisage. L'avancée du robot est de type pas à pas le retour est assuré en vitesse rapide par traction sur l'ombilic.

2.3 Liste des équipements

Les tableaux suivants présentent les équipements du SS1 par process, par tranche et par fonction.

2.3.1 Process « Fond commun »

Désignation	Localisation	Fonction	Tranche	Qté	Unité	Poids total (kg)	Coût M&T (k€)
Chariots de transfert (essais)	ZSL Travaux	Soutien logistique	T1	1	U	41000	976
Equipement de levage navette	ZSL Exploitation	Soutien logistique	T1	1	U	10000	244
Equipement d'intervention chariots de transferts (chariot simplifié)	ZSL Exploitation	Soutien logistique	T1	1	U	28700	683
Tables tournantes	ZSL Exploitation	Transfert hottes dans galerie de liaison	T1	5	U	50000	2 510
Voie galerie de liaison	ZSL Exploitation	Transfert hottes dans galerie de liaison	T1	510	m	114750	829
Equipement de levage navette	ZSL Travaux	Soutien logistique	Tu	1	U	10000	244

Tableau 1 - Liste des équipements du process « Fond commun »

2.3.2 Process « Fond HA »

Désignation	Localisation	Fonction	Tranche	Qté	Unité	Poids total (kg)	Coût M&T (k€)
Opercule cellule de chargement HA	Installations nucléaires de surface (déchargement - contrôle - conditionnement)	Accostage et transfert des hottes en surface	T1	1	U	80000	1 035
Palonnier HA	Installations nucléaires de surface (déchargement - contrôle - conditionnement)	Accostage et transfert des hottes en surface	T1	1	U	10000	207
Plancher d'accostage HA	Installations nucléaires de surface (déchargement - contrôle - conditionnement)	Accostage et transfert des hottes en surface	T1	1	U	7500	101
Table tournante (orientation hottes HA)	Installations nucléaires de surface (déchargement - contrôle - conditionnement)	Accostage et transfert des hottes en surface	T1	1	U	18000	904
Bouchon de radioprotection fermeture HA (BRPF)	Alvéole HA	fermeture des alvéoles de stockage	T1	14	U	40040	539
Machine à souder bouchon métal HA	ZSL Exploitation	fermeture des alvéoles de stockage	T1	1	U	25000	243

Désignation	Localisation	Fonction	Tranche	Qté	Unité	Poids total (kg)	Coût M&T (k€)
Hotte HA modèle D635 (AVM)	Installations nucléaires de surface (déchargement - contrôle - conditionnement)	Hottes HA	T1	4	U	222800	7 725
Hotte HA modèle D635 (AVM)(essais)	ZSL Travaux	Hottes HA	T1	1	U	55700	1 931
Bouchon de radioprotection exploitation HA (BRPE)	Alvéole HA	Introduction des colis dans la tête de l'alvéole	T1	14	U	45640	614
Cadre fixe HA0	Alvéole HA	Introduction des colis dans la tête de l'alvéole	T1	14	U	28000	956
Cadre mobile HA0	Alvéole HA	Introduction des colis dans la tête de l'alvéole	T1	14	U	56000	1 913
Ensemble robot pousseur pour alvéole 80m	Galerie d'accès HA	Mise en place colis de stockage dans alvéole	T1	1	U	17000	598
Ensemble robot de retrait CS HA	ZSL Exploitation	Retrait des colis	T1	1	U	55000	419
Equipement de manutention des cadres mobiles HA0	ZSL Exploitation	Soutien logistique	T1	2	U	0	621
Navette HA0	Galerie d'accès HA	Transfert hottes dans galerie accès	T1	1	U	41000	1 400
Voie galerie d'accès HA0	Galerie d'accès HA	Transfert hottes dans galerie accès	T1	1365	m	307125	2 218
Chaise intersection liaison/accès	Galerie de liaison HA	Transfert hottes dans galerie de liaison	T1	1	U	2500	65
Voie galerie de liaison	Galerie de liaison HA	Transfert hottes dans galerie de liaison	T1	440	m	98888	714
Bouchon de radioprotection fermeture HA (BRPF)	Alvéole HA	fermeture des alvéoles de stockage	Tu	36	U	102960	1 385
Bouchon de radioprotection fermeture HA (BRPF)	Alvéole HA	fermeture des alvéoles de stockage	Tu	22	U	47300	636
Bouchon de radioprotection fermeture HA (BRPF)	Alvéole HA	fermeture des alvéoles de stockage	Tu	1465	U	314975 0	42 380
Machine à souder bouchon métal HA	ZSL Exploitation	fermeture des alvéoles de stockage	Tu	1	U	25000	243
Machine à souder bouchon métal HA	ZSL Exploitation	fermeture des alvéoles de stockage	Tu	3	U	75000	730

Désignation	Localisation	Fonction	Tranche	Qté	Unité	Poids total (kg)	Coût M&T (k€)
Hotte HA modèle D570	Installations nucléaires de surface (déchargement - contrôle - conditionnement)	Hottes HA	Tu	3	U	161400	5 596
Hotte HA modèle HA1/2 D570	Installations nucléaires de surface (déchargement - contrôle - conditionnement)	Hottes HA	Tu	5	U	269000	9 327
Hotte HA modèle HA1/2 D570 (essais)	ZSL Travaux	Hottes HA	Tu	1	U	53800	1 865
Bouchon de radioprotection exploitation HA (BRPE)	Alvéole HA	Introduction des colis dans la tête de l'alvéole	Tu	11	U	30800	414
Bouchon de radioprotection exploitation HA (BRPE)	Alvéole HA	Introduction des colis dans la tête de l'alvéole	Tu	100	U	280000	3 767
Cadre fixe HA0	Alvéole HA	Introduction des colis dans la tête de l'alvéole	Tu	36	U	72000	2 459
Cadre fixe HA0	Alvéole HA	Introduction des colis dans la tête de l'alvéole	Tu	22	U	44000	1 503
Cadre fixe HA1/2	Alvéole HA	Introduction des colis dans la tête de l'alvéole	Tu	1465	U	293000 0	100 074
Cadre mobile HA0	Alvéole HA	Introduction des colis dans la tête de l'alvéole	Tu	11	U	44000	1 503
Cadre mobile HA1/2	Alvéole HA	Introduction des colis dans la tête de l'alvéole	Tu	100	U	400000	13 662
Ensemble robot pousseur pour alvéole 100m	Galerie d'accès HA	Mise en place colis de stockage dans alvéole	Tu	3	U	51000	1 795
Ensemble robot pousseur pour alvéole 80m	Galerie d'accès HA	Mise en place colis de stockage dans alvéole	Tu	1	U	17000	598
Equipement de maintenance des cadres mobiles HA1/2	ZSL Exploitation	Soutien logistique	Tu	2	U	0	621
Navette HA	Galerie d'accès HA	Transfert hottes dans galerie accès	Tu	5	U	205000	7 002
Navette HA0	Galerie d'accès HA	Transfert hottes dans galerie accès	Tu	1	U	41000	1 400
Voie galerie d'accès HA	Galerie d'accès HA	Transfert hottes dans galerie accès	Tu	3552 0	m	799200 0	57 718

Désignation	Localisation	Fonction	Tranche	Qté	Unité	Poids total (kg)	Coût M&T (k€)
Voie galerie d'accès HA0	Galerie d'accès HA	Transfert hottes dans galerie accès	Tu	1120	m	252000	1 820
Chaise intersection liaison/accès	Galerie de liaison HA	Transfert hottes dans galerie de liaison	Tu	7	U	17500	453
Voie galerie de liaison	Galerie de liaison HA	Transfert hottes dans galerie de liaison	Tu	1425	m	320603	2 315

Tableau 2 - Liste des équipements du process « Fond HA »

2.3.3 Process « MAVL »

Désignation	Localisation	Fonction	Tranche	Qté	Unité	Poids total (kg)	Coût M&T (k€)
Palonnier MAVL	Installations nucléaires de surface (déchargement - contrôle - conditionnement)	Accostage et transfert des hottes en surface	T1	1	U	6000	124
Plancher d'accostage MAVL	Installations nucléaires de surface (déchargement - contrôle - conditionnement)	Accostage et transfert des hottes en surface	T1	3	U	22500	303
Porte cellule de chargement MAVL	Installations nucléaires de surface (déchargement - contrôle - conditionnement)	Accostage et transfert des hottes en surface	T1	3	U	465000	3 369
Equipement de pose de blocs de radio protection MAVL	Alvéole MAVL	fermeture des alvéoles de stockage	T1	1	U	10000	347
Hotte modèle CS2-3	Installations nucléaires de surface (déchargement - contrôle - conditionnement)	Hottes MA	T1	5	U	365000	12 655
Hotte modèle CS2-3 (essais)	ZSL Travaux	Hottes MA	T1	1	U	73000	2 531
Ensemble façade d'accostage + portes	Galerie d'accès MAVL	Introduction des colis dans la tête de l'alvéole	T1	4	U	774000	26 436
Plancher d'accostage MAVL	Galerie d'accès MAVL	Introduction des colis dans la tête de l'alvéole	T1	4	U	30000	404
Blocs limitation chute par couche CS1 à CS5	Alvéole MAVL	Mise en place colis de stockage dans alvéole	T1	4	ens	0	290

Désignation	Localisation	Fonction	Tranche	Qté	Unité	Poids total (kg)	Coût M&T (k€)
Elévateur de CS	Alvéole MAVL	Mise en place colis de stockage dans alvéole	T1	4	U	0	4 140
Pont gerbeur CS1 à CS5	Alvéole MAVL	Mise en place colis de stockage dans alvéole	T1	4	U	0	9 108
Porte intérieure alvéole MAVL pont gerbeur CS1 à CS5	Alvéole MAVL	Mise en place colis de stockage dans alvéole	T1	4	U	312000	7 572
Système de transfert CS en cellule	Alvéole MAVL	Mise en place colis de stockage dans alvéole	T1	4	U	0	3 312
Treuil récupération pont gerbeur (lièvre)	Alvéole MAVL	Mise en place colis de stockage dans alvéole	T1	8	U	20800	721
Voie pont gerbeur alvéole CS1 à CS5	Alvéole MAVL	Mise en place colis de stockage dans alvéole	T1	2092	m	418400	1 624
Equipement de contrôle contamination MAVL (CB)	Alvéole MAVL	Retrait des colis	T1	1	ens	2000	1 035
Equipement de fixation contamination MAVL	Alvéole MAVL	Retrait des colis	T1	1	ens	250	207
Robot d'intervention - dépannage MAVL	ZSL Exploitation	Soutien logistique	T1	2	U	4000	1 294
Navette accostage MAVL	Galerie d'accès MAVL	Transfert hottes dans galerie accès	T1	4	U	102000	2 481
Voie navette accostage MAVL	Galerie d'accès MAVL	Transfert hottes dans galerie accès	T1	220	m	44080	308
Chaise intersection liaison/accès	Galerie de liaison MAVL	Transfert hottes dans galerie de liaison	T1	22	U	55000	1 423
Chariots de transfert	Galerie de liaison MAVL	Transfert hottes dans galerie de liaison	T1	3	U	123000	2 928
Voie galerie de liaison	Galerie de liaison MAVL	Transfert hottes dans galerie de liaison	T1	2949	m	663435	4 791
Equipement de pose de blocs de radio protection MAVL	Alvéole MAVL	fermeture des alvéoles de stockage	Tu	3	U	30000	1 040
Hotte modèle CS1-4-6-7	Installations nucléaires de surface (déchargement - contrôle - conditionnement)	Hottes MA	Tu	5	U	310000	10 748
Hotte modèle CS1-4-6-7 (essais)	ZSL Travaux	Hottes MA	Tu	1	U	62000	2 150

Désignation	Localisation	Fonction	Tranche	Qté	Unité	Poids total (kg)	Coût M&T (k€)
Hotte modèle CS5	Installations nucléaires de surface (déchargement - contrôle - conditionnement)	Hottes MA	Tu	5	U	270000	9 362
Hotte modèle CS5 (essais)	ZSL Travaux	Hottes MA	Tu	1	U	54000	1 872
Ensemble façade d'accostage + portes	Galerie d'accès MAVL	Introduction des colis dans la tête de l'alvéole	Tu	46	U	890100 0	304 014
Plancher d'accostage MAVL	Galerie d'accès MAVL	Introduction des colis dans la tête de l'alvéole	Tu	46	U	345000	4 642
Blocs limitation chute par couche CS1 à CS5	Alvéole MAVL	Mise en place colis de stockage dans alvéole	Tu	43	ens	0	3 115
Chariot gerbeur CS6 et CS7	Alvéole MAVL	Mise en place colis de stockage dans alvéole	Tu	3	U	0	3 105
Élévateur de CS	Alvéole MAVL	Mise en place colis de stockage dans alvéole	Tu	43	U	0	48 956
Pont gerbeur CS1 à CS5	Alvéole MAVL	Mise en place colis de stockage dans alvéole	Tu	43	U	0	97 911
Porte intérieure alvéole MAVL Chariot gerbeur CS6 et CS7	Alvéole MAVL	Mise en place colis de stockage dans alvéole	Tu	3	U	7500	182
Porte intérieure alvéole MAVL pont gerbeur CS1 à CS5	Alvéole MAVL	Mise en place colis de stockage dans alvéole	Tu	43	U	335400 0	81 404
Système de transfert CS en cellule	Alvéole MAVL	Mise en place colis de stockage dans alvéole	Tu	43	U	0	35 604
Treuil récupération chariot gerbeur CS6 / CS7 (lièvre)	Alvéole MAVL	Mise en place colis de stockage dans alvéole	Tu	3	U	7800	270
Treuil récupération pont gerbeur (lièvre)	Alvéole MAVL	Mise en place colis de stockage dans alvéole	Tu	86	U	223600	7 753
Voie chariot gerbeur alvéole CS6	Alvéole MAVL	Mise en place colis de stockage dans alvéole	Tu	480	m	41376	671
Voie chariot gerbeur alvéole CS7	Alvéole MAVL	Mise en place colis de stockage dans alvéole	Tu	60	m	5172	84

Désignation	Localisation	Fonction	Tranche	Qté	Unité	Poids total (kg)	Coût M&T (k€)
Voie pont gerbeur alvéole CS1 à CS5	Alvéole MAVL	Mise en place colis de stockage dans alvéole	Tu	22489	m	4497800	17 457
Robot d'intervention - dépannage MAVL	ZSL Exploitation	Soutien logistique	Tu	2	U	4000	1 294
Navette accostage MAVL	Galerie d'accès MAVL	Transfert hottes dans galerie accès	Tu	46	U	1173000	28 530
Voie navette accostage MAVL	Galerie d'accès MAVL	Transfert hottes dans galerie accès	Tu	2535	m	506920	3 541
Chaise intersection liaison/accès	Galerie de liaison MAVL	Transfert hottes dans galerie de liaison	Tu	28	U	70000	1 811
Chariots de transfert	Galerie de liaison MAVL	Transfert hottes dans galerie de liaison	Tu	1	U	41000	976
Voie galerie de liaison	Galerie de liaison MAVL	Transfert hottes dans galerie de liaison	Tu	1590	m	357800	2 584

Tableau 3 - Liste des équipements du process « MAVL »

2.3.4 Process « Surface »

Désignation	Localisation	Fonction	Tranche	Qté	Unité	Poids total (kg)	Coût M&T (k€)
Machine à Levage Limitée parc à hotte	Installations nucléaires de surface (déchargement - contrôle - conditionnement)	Accostage et transfert des hottes en surface	T1	1	U	85000	8 280
Navette transbordeur descenderie	Bâtiment tête de descenderie colis	Accostage et transfert des hottes en surface	T1	2	U	52800	1 847
Transbordeur double voie	Bâtiment tête de descenderie colis	Accostage et transfert des hottes en surface	T1	1	U	58500	2 047
Voie navette liaison descenderie	Bâtiment tête de descenderie colis	Accostage et transfert des hottes en surface	T1	50	m	11250	70
Navette liaison atelier / parc à hottes	Installations nucléaires de surface (déchargement - contrôle - conditionnement)	Soutien logistique	T1	1	U	26400	929
Pont de maintenance transbordeur et navettes	Bâtiment tête de descenderie colis	Soutien logistique	T1	1	U	0	373

Désignation	Localisation	Fonction	Tranche	Qté	Unité	Poids total (kg)	Coût M&T (k€)
Pont de montage hottes et maintenance équipements	Installations nucléaires de surface (déchargement - contrôle - conditionnement)	Soutien logistique	T1	1	U	0	518
Voie navette liaison atelier maintenance	Installations nucléaires de surface (déchargement - contrôle - conditionnement)	Soutien logistique	T1	40	m	9000	56
Navette transbordeur descenderie	Bâtiment tête de descenderie colis	Accostage et transfert des hottes en surface	Tu	2	U	52800	1 847
Transbordeur double voie	Bâtiment tête de descenderie colis	Accostage et transfert des hottes en surface	Tu	1	U	58500	2 047
Voie navette liaison descenderie	Bâtiment tête de descenderie colis	Accostage et transfert des hottes en surface	Tu	50	m	11250	70
Pont de maintenance transbordeur et navettes	Bâtiment tête de descenderie colis	Soutien logistique	Tu	1	U	0	373

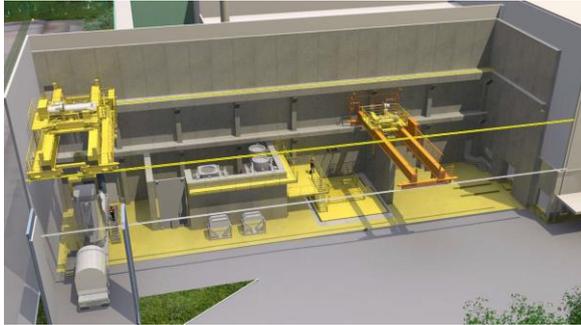
Tableau 4 - Liste des équipements du process « Surface »

3. Méthodologie de chiffrage

Le chiffrage est présenté aux conditions économiques de janvier 2012 et tous les coûts sont présentés hors taxe.

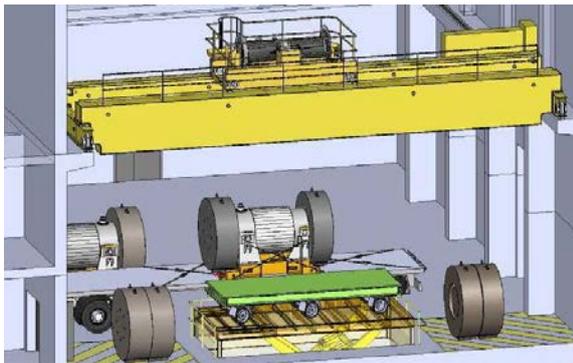
3.1 Investissement initial

Les coûts unitaires sont issus des bases de coûts de la MOe-S qui consolident l'ensemble des projets menés par les entreprises du groupement (maîtrise d'œuvre bâtiment et process d'un projet de modification de l'installation STAR du CEA Cadarache, marché de conception/réalisation de l'installation ICEDA sur le site EDF du Bugey, ...).



Projet ICEDA – EDF CIDEN

Ingérop assure un rôle de concepteur d'ensemble de cette installation équipée de nombreux équipements : ponts, lorry...



Projet de modification de l'installation STAR

Maîtrise d'œuvre bâtiment et process

Ingérop en partenariat avec ATR (sous-traitant de Gaiya) a notamment réalisé la reprise des principes de manutention dans l'installation : chariots automoteurs, ascenseur, vérin suiveur...

Le chiffrage du process nucléaire réalisé par le MOe-S a été contrôlé par l'Andra et audité par PwC :

- Analyse du choix de la typologie pour les principaux équipements ;
- Analyse des quantitatifs ;
- Analyse des incertitudes ;
- Comparaison avec des données issues de précédents chiffrages (SGN, CNIM).

3.2 Maîtrise d'œuvre, maîtrise d'ouvrage et AMO réglementaires

Les hypothèses de chiffrage sont présentées dans la note « Estimation du coût de base de maîtrise d'œuvre et de maîtrise d'ouvrage », le tableau suivant présente les taux retenus.

Tranches	Types	Ratios
T1	MOe de conception	Intégrées au PMT et présentées dans la note MOe/MOA
	MOA	
	AMO réglementaires	
	MOe de réalisation équipements	17%
Tu	MOe de conception	2%
	MOA	3%
	AMO réglementaires	0.5%
	MOe de réalisation équipements (y/c jouvence et démantèlement)	12% ¹

Tableau 5 – Taux de MOe, MOA et AMO réglementaires

3.3 Démantèlement

Les coûts de démantèlement sont établis à partir de ratios appliqués aux postes de M&T, hors essais de qualification.

En s'appuyant sur le REX fourni par les producteurs, la valeur retenue par l'Andra pour le chiffrage est de 10%.

3.4 Jouvence

Les hypothèses relatives à la jouvence sont présentées dans la note hypothèses économiques et calendaires.

3.5 Pièces de rechange

A ce stade des études, le montant annuel des pièces de rechange est estimé sur la base de ratios par nature de poste avec comme hypothèse que 10 alvéoles sont ouverts simultanément. La note dédiée à l'exploitation de Cigéo détaille la méthode retenue.

Le tableau suivant rappelle les ratios appliqués.

Natures de poste	Ratios
Mécanique	0.50%

Tableau 6 – Ratios appliqués par nature de poste pour les pièces de rechange

4. Estimation du coût de base

L'estimation du coût de base est réalisée par la MOe-S à partir de données fournies par les différentes MOe-SS pour chacun des sous-systèmes. Ce chapitre synthétise le coût de base associé au périmètre du sous-système 1 « équipements du process nucléaire ».

Certains coûts présentés ici à titre indicatif sont consolidés dans des notes de chiffrage distinctes Il s'agit en particulier :

- Des coûts de MOe, de MOA et d'AMO réglementaires (note dédiée) ;
- Des coûts de pièces de rechange (remontés dans le chiffrage de l'exploitation).

¹ Il est fait l'hypothèse d'une réduction de 30 % du ratio de MOe réalisation pour prendre en compte un effet de répétitivité lors des tranches ultérieures.

4.1 Périmètre et limites de prestations

Sont inclus dans cette estimation

- La construction initiale des équipements d'infrastructure et pour les premiers alvéoles de stockage en tranche 1 ;
- La construction initiale des équipements d'infrastructure et pour les autres alvéoles de stockage en tranches ultérieures ;
- Le démantèlement des équipements en fin de vie ;
- La jouvence : renouvellement des équipements pendant la durée d'exploitation.

Les coûts présentés comprennent :

- Les coûts d'études fournisseurs hors phase APS/APD ;
- Les approvisionnements ;
- La fabrication ;
- Le montage ;
- Les essais ;
- La dotation initiale de pièces de rechange.

Sont exclus de cette estimation

- Les coûts de maîtrise d'œuvre de conception en tranche 1 ;
- Les coûts de maîtrise d'ouvrage en tranche 1 ;
- Les coûts associés aux organismes de contrôles réglementaires (AMO réglementaires) en tranche 1 ;
- Les aléas de réalisation ;
- Les assurances, les impôts et taxes.

4.2 Investissement de la Tranche 1

Le tableau ci-dessous synthétise la décomposition des coûts d'investissement de la tranche 1 comprenant les équipements en surface et communs au fond ainsi que les équipements pour les cellules de manutention MAVL et les alvéoles HA0. Ils sont présentés aux conditions économiques de janvier 2012.

	Total	
<i>Process surface</i>	15.5 M€	
<i>Process commun</i>	5.7 M€	
<i>Process MAVL</i>	96.0 M€	
<i>Process HA</i>	24.4 M€	
Total M&T (y/c frais transverses)	142 M€	
<i>MOe de conception</i>		cf. note MOe/MOA
<i>MOe de réalisation</i>	24.1 M€	
Total MOe	24 M€	
<i>AMO réglementaires</i>		cf. note MOe/MOA
<i>MOA</i>		cf. note MOe/MOA
Total MOA		
Total	166 M€	

Tableau 7 - Décomposition du coût d'investissement du process nucléaire en tranche 1

Pour les investissements à réaliser en tranche 1, les coûts de MOe de conception, de MOA et d'AMO réglementaires sont traités globalement et non à l'échelle de chaque sous-système (cf. note « Estimation du coût de base de maîtrise d'œuvre et de maîtrise d'ouvrage »).

4.3 Autres tranches de construction

Le tableau ci-dessous synthétise la décomposition des coûts d'investissement des tranches ultérieures comprenant les équipements pour les cellules de manutention MAVL et les alvéoles HA. Ils sont présentés aux conditions économiques de janvier 2012.

	Total
<i>Process surface</i>	4.8 M€
<i>Process commun</i>	0.3 M€
<i>Process MAVL</i>	735.8 M€
<i>Process HA</i>	283.7 M€
Total M&T (y/c frais transverses)	1 025 M€
<i>MOe de conception</i>	20.5 M€
<i>MOe de réalisation</i>	122.9 M€
Total MOe	143 M€
<i>AMO réglementaires</i>	5.1 M€
<i>MOA</i>	30.7 M€
Total MOA	36 M€
Total	1 204 M€

Tableau 8 - Décomposition du coût d'investissement du process nucléaire pour les tranches ultérieures

4.4 Jouvence

Les tableaux ci-dessous synthétisent la décomposition des coûts de jouvence des équipements aux conditions économiques de janvier 2012.

	Total
<i>Process surface</i>	2.7 M€
<i>Process commun</i>	4.9 M€
<i>Process MAVL</i>	11.5 M€
<i>Process HA</i>	2.2 M€
Total M&T (y/c frais transverses)	21 M€
<i>MOe de conception</i>	0.4 M€
<i>MOe de réalisation</i>	2.5 M€
Total MOe	3 M€
<i>AMO réglementaires</i>	0.1 M€
<i>MOA</i>	0.6 M€
Total MOA	1 M€
Total	25 M€

Tableau 9 - Décomposition des coûts de jouvence du process nucléaire

4.5 Démantèlement

Le tableau ci-dessous synthétise la décomposition des coûts de démantèlement des équipements aux conditions économiques de janvier 2012.

	Total
<i>Process surface</i>	2.0 M€
<i>Process commun</i>	0.6 M€
<i>Process MAVL</i>	96.5 M€
<i>Process HA</i>	25.8 M€
Total M&T (y/c frais transverses)	125 M€
<i>MOe de conception</i>	2.5 M€
<i>MOe de réalisation</i>	15.0 M€
Total MOe	18 M€
<i>AMO réglementaires</i>	0.6 M€
<i>MOA</i>	3.8 M€
Total MOA	4 M€
Total	147 M€

Tableau 10 - Décomposition du coût de démantèlement du process nucléaire

4.6 Pièces de rechange

Le tableau ci-dessous synthétise la décomposition des coûts de pièces de rechange aux conditions économiques de janvier 2012.

	Assiette T1	Assiette Tu	pdR T1	PdR Tu	Total
<i>Process surface</i>	15.5 M€	4.8 M€	9.2 M€	1.6 M€	10.8 M€
<i>Process commun</i>	5.7 M€	0.3 M€	3.4 M€	0.1 M€	3.5 M€
<i>Process MAVL</i>	96.0 M€	735.8 M€	34.1 M€	30.4 M€	64.4 M€
<i>Process HA</i>	24.4 M€	283.7 M€	1.2 M€	46.9 M€	48.2 M€
Total pièces de rechange	142 M€	1 025 M€	48 M€	79 M€	127 M€

Tableau 11 - Tableau de synthèse des coûts de pièces de rechange

4.7 Synthèse des investissements

Le tableau suivant synthétise l'ensemble des investissements présentés en rappelant les coûts de MOe, de MOA et d'AMO réglementaires.

	T1	Tu	Déman-tèlement	Jouvence	Total
Total M&T	142 M€	1 025 M€	125 M€	21 M€	1 312 M€
<i>MOe de conception</i>		20.5 M€	2.5 M€	0.4 M€	23 M€
<i>MOe de réalisation</i>	24.1 M€	122.9 M€	15.0 M€	2.5 M€	165 M€
Total MOe	24 M€	143 M€	18 M€	3 M€	188 M€
<i>AMO réglementaires</i>		5.1 M€	0.6 M€	0.1 M€	6 M€
<i>MOA</i>		30.7 M€	3.8 M€	0.6 M€	35 M€
Total MOA		36 M€	4 M€	1 M€	41 M€
Total	166 M€	1 204 M€	147 M€	25 M€	1 541 M€

Tableau 12 - Tableau de synthèse des coûts d'investissement

4.8 Analyse des écarts entre Jesq05 et Japs03b

Le tableau ci-dessous présente de manière synthétique les écarts entre le chiffrage fin 2013 et le chiffrage J_{aps} 3b.

Investissements	Jesq05 (M€)	Japs03b (M€)	Ecarts (M€)	Commentaires
M&T tranche 1	82	142	+60	Prise en compte des équipements mécaniques pour les 4 alvéoles MAVL construits en tranche 1.
Sous total T1	82	142	+60	
M&T tranches ultérieures	1 142	1 025	-117	Evolution du nombre d'alvéoles et des linéaires de galeries. Mutualisation des hottes et réduction du nombre de façade d'accostage.
Jouvence	25	21	-4	Optimisation du calcul de la jouvence des équipements..
Démantèlement	130	125	-5	Certains équipements restant au fond avaient été comptabilisés dans le précédent calcul du démantèlement.
Sous total Tu	1 297	1 171	-126	
TOTAL	1 379	1 313	-66	

Tableau 13 - Analyse des écarts

4.9 Chronique de dépenses

La chronique de dépenses est calculée selon les hypothèses décrites dans la note « Hypothèses économiques et calendaires ». Elle est ainsi caractérisée par plusieurs périodes :

- 2023 - 2028 : investissement de la tranche 1 avec un pic de dépenses annuelles ;
- 2029 - 2077 : extension du parc d'équipements MAVL (cellules de manutention) en lien avec l'extension du nombre d'alvéoles MAVL (~10 à 12 M€/an) ;
- 2078 - 2099 : concomitance de l'extension du parc d'équipements MAVL et début de l'acquisition du parc d'équipements pour les déchets HA fortement exothermiques (~16 à 17 M€/an) ;
- 2100 - 2119 : extension du parc d'équipements HA en lien avec l'extension du nombre d'alvéoles et démantèlement des équipements MAVL (~ 6 M€/an) ;
- 2120 - 2144 : poursuite de l'extension du parc d'équipements HA (~ 5 M€/an) ;
- 2145 - 2150 : démantèlement des équipements de surface, communs et spécifiques HA (< 1 M€/an).

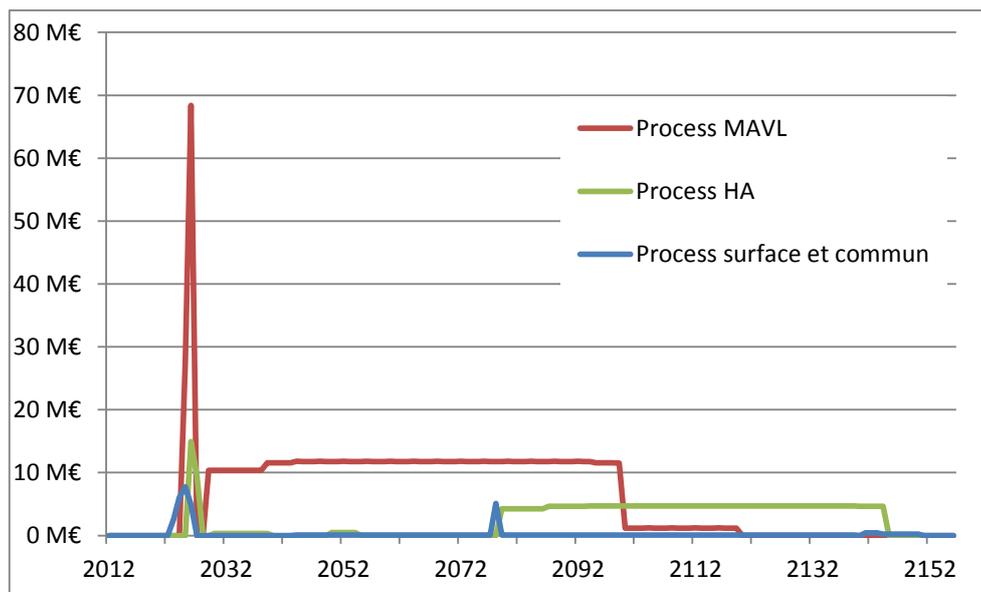


Figure 11 - Chronogramme des dépenses pour le coût de base

CHIFFRAGE CIGÉO EN PHASE ESQUISSE

Estimation du coût de base Bâtiments nucléaires de surface (SS2)

Identification

CG.TE.F.NTE.AMOA.EEE.2000.14.006 1/B

Octobre 2014

Pages : **51**

SOMMAIRE

1.	Objet du document	5
2.	Conception et dimensionnement de l'installation nucléaire	5
2.1	<i>Evolution de la conception entre J_{esq}_05 et J_{aps}_03b</i>	5
2.2	<i>Principes de conception</i>	5
2.2.1	Intégration des évolutions de la chronique de livraison	5
2.2.2	Intégration des évolutions issues des études d'optimisations et des choix système	5
2.3	<i>Synthèse des caractéristiques</i>	14
2.4	<i>Liste des équipements</i>	16
3.	Méthodologie de chiffrage	16
3.1	<i>Investissement initial</i>	16
3.2	<i>Cas du prix unitaire du m³ de béton</i>	17
3.3	<i>Maîtrise d'œuvre, maîtrise d'ouvrage et AMO réglementaires</i>	18
3.4	<i>Démantèlement</i>	18
3.5	<i>Jouvence</i>	18
3.6	<i>Pièces de rechange</i>	18
4.	Estimation du coût de base	19
4.1	<i>Périmètre et limites de prestations</i>	19
4.2	<i>Investissement de la tranche 1</i>	20
4.3	<i>Autres tranches de construction</i>	21
4.3.1	Bâtiment EP1 – Bloc 3	21
4.3.2	Bâtiment EP2	22
4.4	<i>Jouvence</i>	23
4.5	<i>Démantèlement</i>	23
4.6	<i>Pièces de rechange</i>	23
4.7	<i>Synthèse des investissements</i>	24
4.8	<i>Analyse des écarts entre J_{esq}_05 et J_{aps}_03b</i>	24
4.9	<i>Chronique de dépenses</i>	25
	Annexe 1 : Plan de repérage des équipements niveau 0	26
	Annexe 2 : Plan de repérage des équipements niveau +6	27
	Annexe 3 : Plan de repérage des équipements niveau +12	28
	Annexe 4 : Liste des équipements	29

TABLES DES ILLUSTRATIONS

Figures

Figure 1 - Implantation des installations nucléaires de surface niveau +0.00 (358 NGF)	6
Figure 2 - Implantation du terminal ferroviaire	7
Figure 3 - Zone de déchargement des convois	7
Figure 4 - Zone de déchargement des emballages de type (V) verticaux	8
Figure 5 - Vue en coupe de l'installation EP1	8
Figure 6 - Réception des emballages de transport et déchargement des emballages de type (V) verticaux	8
Figure 7 - Zone de déchargement des emballages de type (H) horizontaux	9
Figure 8 - Zone de réception et stockage des conteneurs de stockage	10
Figure 9 - Zone de conditionnement	11
Figure 10 - Conditionnement des colis de stockage HA et des colis de stockage MAVL	11
Figure 11 - Zone tampons	12
Figure 12 - Zone des hottes	13
Figure 13 - Zone Traitement des NC	13
Figure 14 - Zone des Contrôles 2 nd Niveau	14
Figure 15 - Chronogramme des dépenses pour le coût de base, total annuel et par installation	25

Tableaux

Tableau 1 - Synthèse des principales caractéristiques du bâtiment nucléaire EP1	15
Tableau 2 - Matrice de conversion « fonctions/blocs » du bâtiment nucléaire EP1	15
Tableau 3 - Volumes ventilés par bloc et par classe de ventilation	16
Tableau 4 - Prix du m ³ de béton par typologie d'ouvrage	17
Tableau 5 - Taux de MOe, MOA et AMO réglementaires	18
Tableau 6 - Ratios appliqués par nature de poste pour les pièces de rechange	18
Tableau 7 - Décomposition du coût d'investissement du bâtiment nucléaire EP1	20
Tableau 8 - Décomposition du coût d'investissement du bâtiment nucléaire EP1 (bloc 3)	21
Tableau 9 - Décomposition du coût d'investissement du bâtiment nucléaire EP2	22
Tableau 10 - Décomposition du coût de jouvence des bâtiments EP1 et EP2	23
Tableau 11 - Décomposition du coût de démantèlement des bâtiments EP1 et EP2	23
Tableau 12 - Tableau de synthèse des coûts de pièces de rechange	23
Tableau 13 - Synthèse des investissements	24
Tableau 14 - Analyse des écarts	24
Tableau 15 - Liste des équipements	50

1. Objet du document

Ce document a pour objet de présenter le chiffrage du coût de base d'investissement des bâtiments nucléaires de surface constituant le sous-système 2 (SS2). Compte tenu de la durée totale d'exploitation de 116 ans, la conception a retenu une réalisation en deux phases articulées sur les deux séquences principales de la chronique de stockage des déchets :

- Bâtiment EP1 pour la gestion des déchets MAVL et HA0 (2029-2099) ;
- Bâtiment EP2 pour la gestion des déchets HA1/2 (2079-2144).

Cette note s'inscrit dans le cadre du processus d'optimisation de l'esquisse aboutissant au choix d'une solution d'ensemble servant de référence pour la constitution du dossier d'APS (jalon J_{aps} 03b).

2. Conception et dimensionnement de l'installation nucléaire

2.1 Evolution de la conception entre J_{esq} 05 et J_{aps} 03b

La conception de référence du bâtiment nucléaire présentée dans la suite du document a été réalisée sur la base de :

- La prise en compte de la solution d'ensemble retenue au jalon J_{aps} 03b intégrant les différentes voies d'optimisation, les études en sensibilité et les sujets d'études retenus lors de la première phase des études d'APS ;
- L'intégration du PIGD version D.

Cette nouvelle conception, validée en termes de choix techniques par la Maîtrise d'Ouvrage (MOA) et la Maîtrise d'œuvre Système (MOe-S), constitue la solution d'ensemble système de référence à développer pour la suite de l'APS.

2.2 Principes de conception

2.2.1 Intégration des évolutions de la chronique de livraison

Les bâtiments d'installations nucléaires de surface issus des études d'esquisse (jalon J_{esq} 05) ont fait l'objet d'études d'optimisation sur la base de la nouvelle chronique de livraison des colis primaires (CP) de déchets issue du PIGD version D.

Cette nouvelle chronique de livraison permet de traiter dans l'installation et à chaque instant :

- une diversité limitée de colis primaires,
- d'optimiser le nombre de lignes de procédés à mettre en place (deux lignes de procédé au lieu de trois).

2.2.2 Intégration des évolutions issues des études d'optimisations et des choix système

Le travail d'optimisation a conduit à limiter les surfaces et les volumes de bâtiment en ré-agençant l'architecture des différents locaux en deux tranches linéaires dédiées au conditionnement des colis de déchets :

- Une ligne pour des colis de déchets HA0 (reconfigurable en ligne MAVL) ;
- Une ligne pour des colis de déchets MAVL.

Un bâtiment juxtaposé permet de réaliser les fonctions « hors ligne process » tels que les contrôles de second niveau et la reprise des non-conformités.

L'agencement proposé :

- offre une meilleure flexibilité,
- permet d'adapter les investissements/équipements en fonction des chroniques de stockage.

2.2.2.1 Implantation générale

- L'implantation en miroir de la tête de descenderie permet une translation d'environ 300 m vers l'Est par rapport à l'esquisse ;
- La tête de descenderie a été positionnée pour conserver une pente de 12% ;

- Le bâtiment est structuré en deux parties (conditionnement) et support (contrôles de second niveau et gestion des non-conformités) ;
- Le tampon des emballages de transport a été repositionné au niveau du terminal ferroviaire (TF).

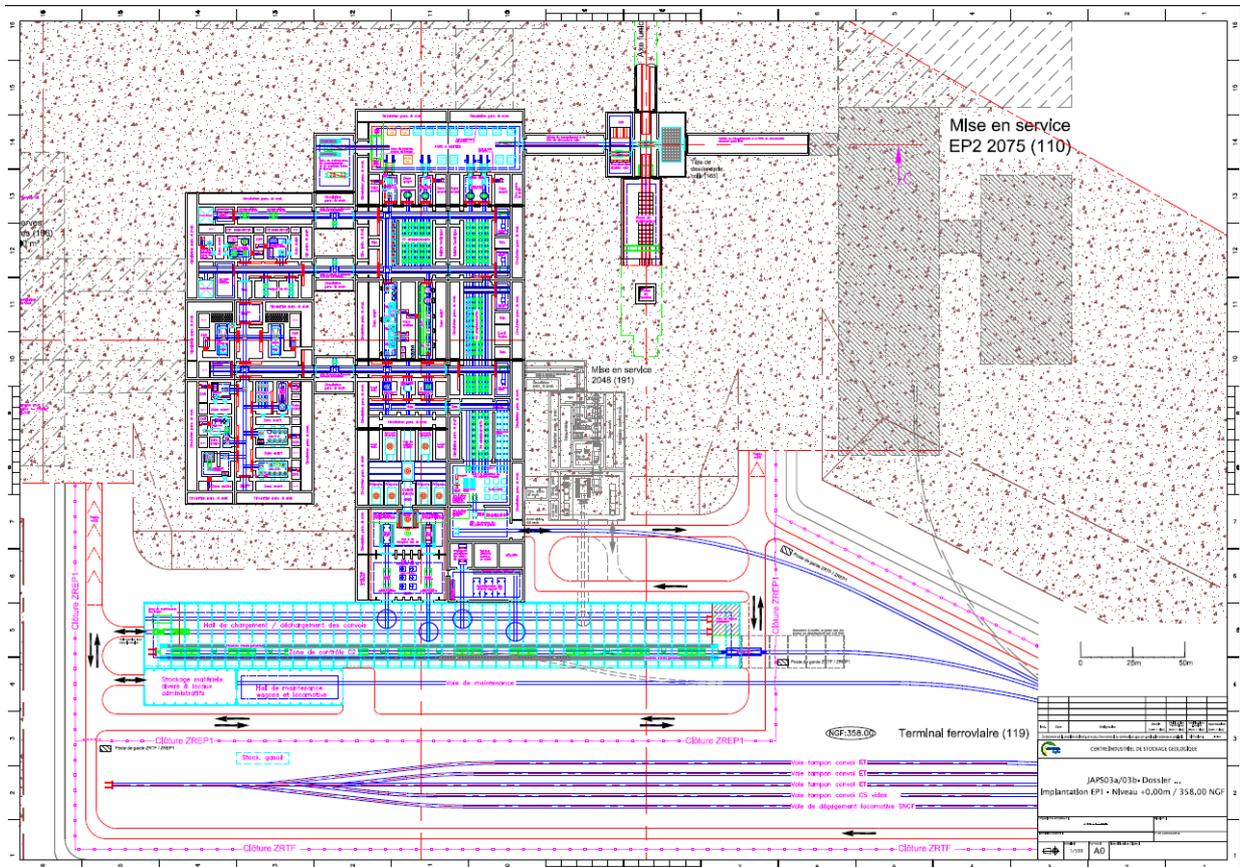


Figure 1 - Implantation des installations nucléaires de surface niveau +0.00 (358 NGF)

2.2.2.2 Terminal ferroviaire

- Le niveau général a été remonté économisant ainsi 6m de terrassement sur l'ensemble de la plateforme ferroviaire. La cote du terminal ferroviaire est de 358 NGF ;
- Une clôture délimitant un périmètre nommé ZRTF permet de séparer la zone du terminal ferroviaire et l'entrée à EP1. L'accès entre la zone ZRTF et ZPN se fera via un poste de garde.

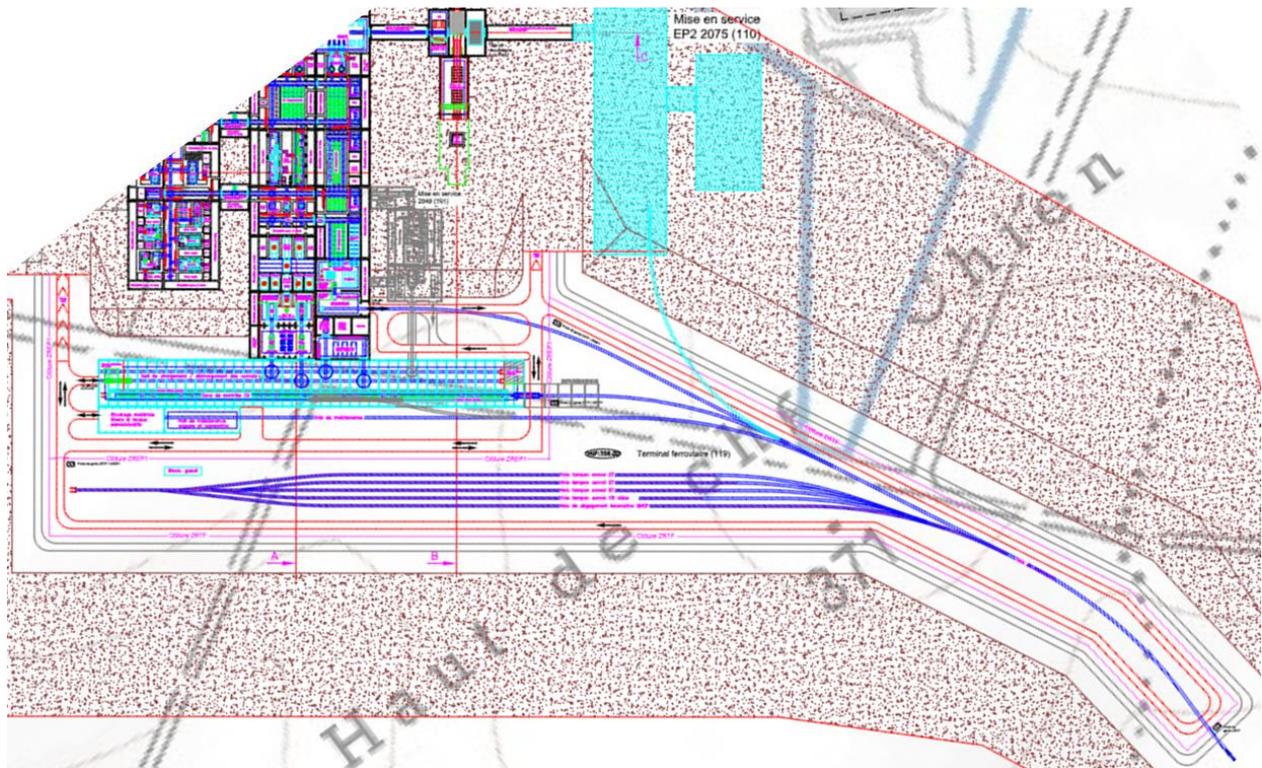


Figure 2 - Implantation du terminal ferroviaire

2.2.2.3 Zone de déchargement des convois

- L'alimentation des conteneurs de stockage se fera par convois ferroviaires ou camions ;
- Les emballages sont déchargés sur lorries autotractés.

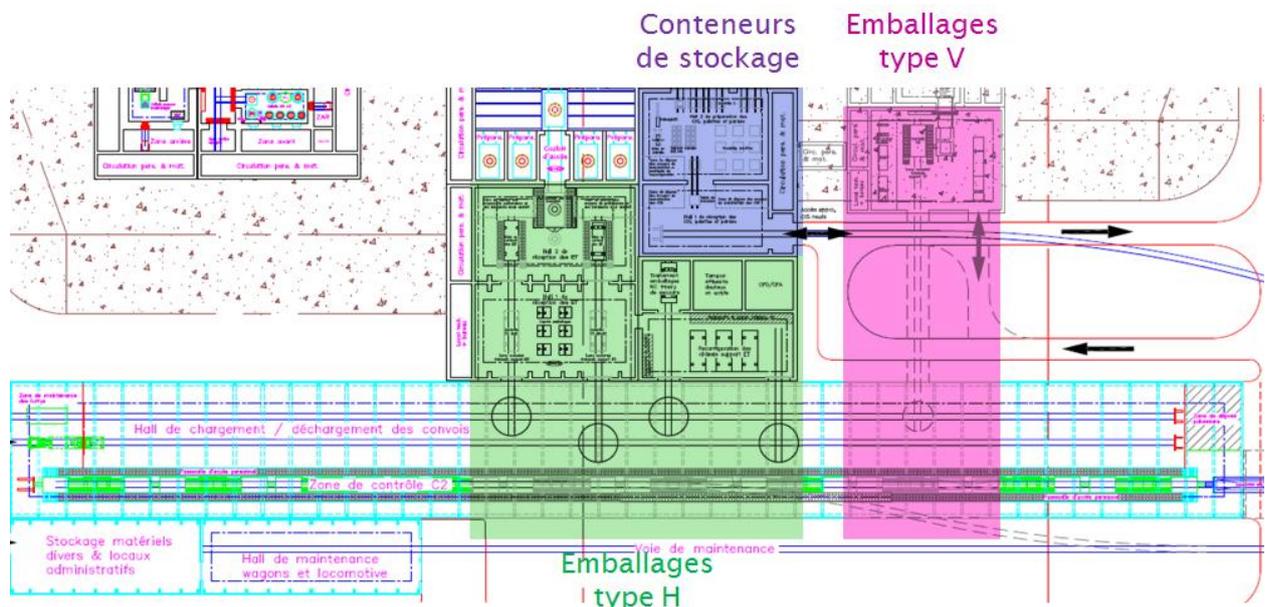


Figure 3 - Zone de déchargement des convois

2.2.2.4 Déchargement des emballages de type (V) verticaux

- La demi-fosse de déchargement des emballages de transport permet de remonter le niveau général de la plateforme du TF à 358 NGF.



Figure 4 - Zone de déchargement des emballages de type (V) verticaux

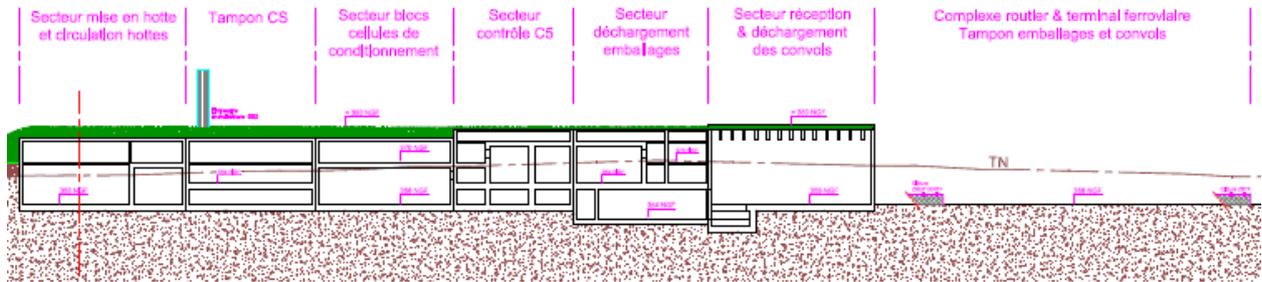


Figure 5 - Vue en coupe de l'installation EPI

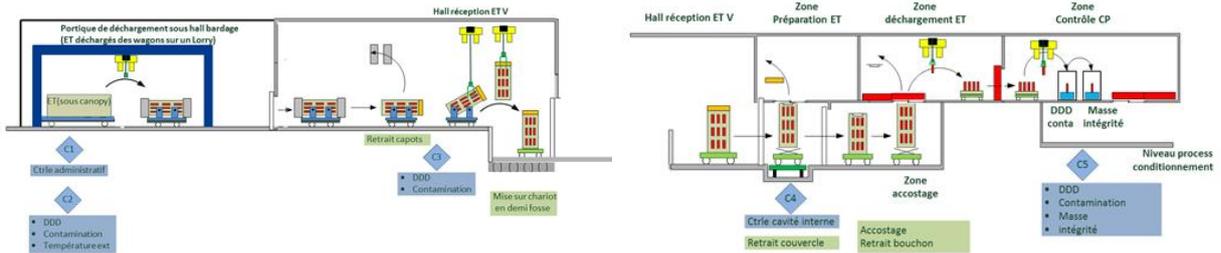


Figure 6 - Réception des emballages de transport et déchargement des emballages de type (V) verticaux

2.2.2.5 Déchargement des emballages de type H horizontaux

- Les cellules de déchargement des emballages de type H et de contrôle C5 ont été reconçues. A ce jour, l'hypothèse de base est la réception des ISO 20' et des RD39. La possibilité de mutualiser cette cellule de déchargement avec celle des emballages de type V sera instruite dans la suite des études d'avant-projet.

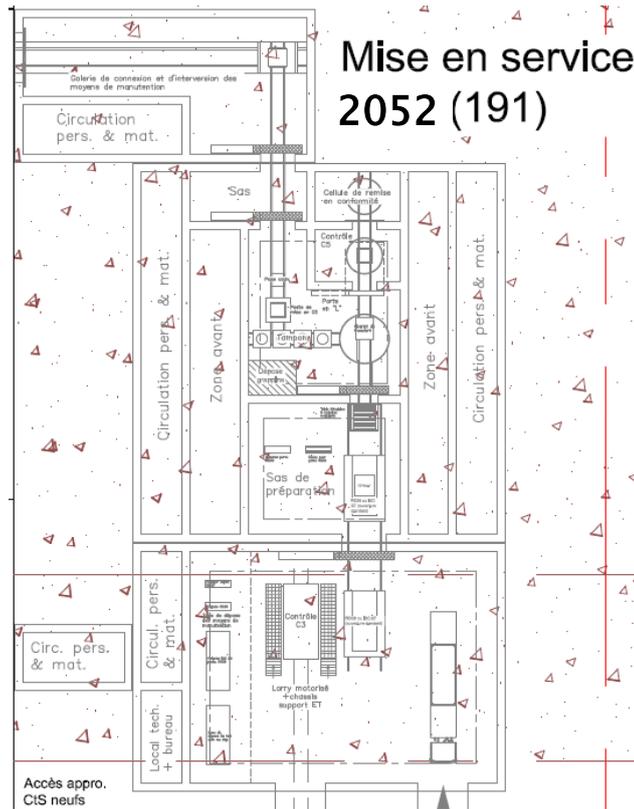


Figure 7 - Zone de déchargement des emballages de type (H) horizontaux

2.2.2.6 Zone de réception et stockage des conteneurs

- Le procédé d'approvisionnement des conteneurs a été modifié et permet un accès spécifique à la zone de chargement des CP en CS ;
- Les conteneurs de stockage (CS) sont utilisés pour le transfert des CP (au lieu de palettes).

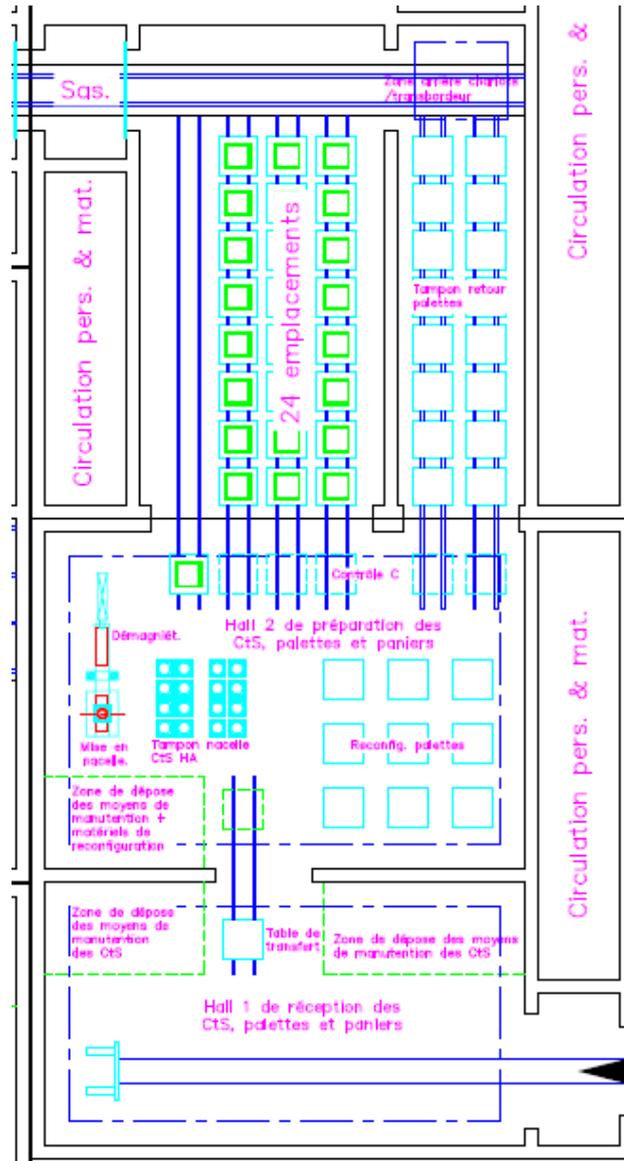


Figure 8 - Zone de réception et stockage des conteneurs de stockage

2.2.2.7 Zone de conditionnement

- Contrôles de fabrication en C6 (après conditionnement) ;
- Contrôles radiologiques en C7 (à présent mutualisés).

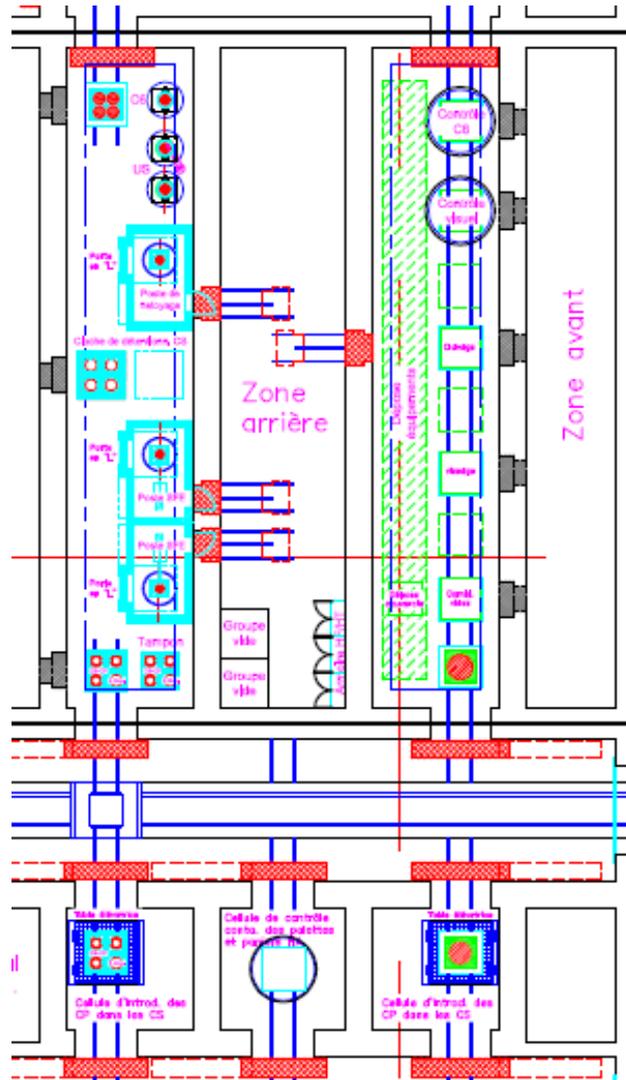


Figure 9 - Zone de conditionnement

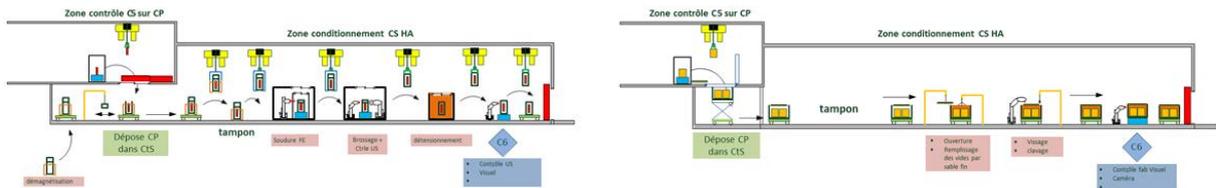


Figure 10 - Conditionnement des colis de stockage HA et des colis de stockage MAVL

2.2.2.8 Zones tampons

- Réduction des zones tampons, liée à la réduction du temps de séchage des colis clavés de 28 à 7 jours, d'autre part à l'amélioration de la fluidité du procédé de conditionnement : la capacité de CS conditionnés est de 70 emplacements, dont la moitié est utilisée pour le séchage des colis clavés ;
- Une capacité de 42 emplacements est dimensionnée pour recevoir aussi bien des CS avant ou après conditionnement (mutualisation des tampons CP et CS).

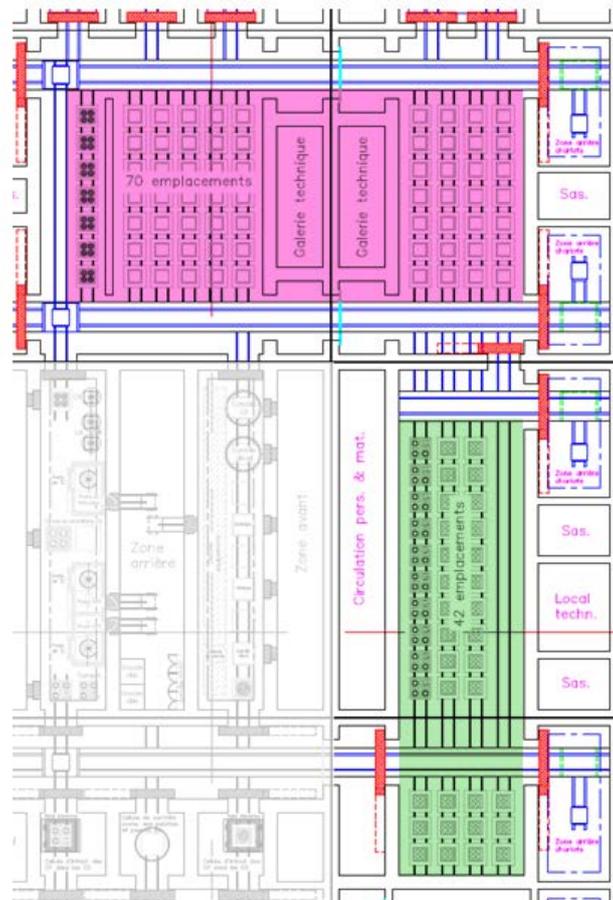


Figure 11 - Zone tampons

2.2.2.9 Zone des hottes

- La standardisation des hottes a permis de réduire à 3 types de hottes MAVL et 2 types de hottes HA. Par conséquent le nombre d'interfaces d'accostages a été diminué de 14 à 4 ;
- Les deux types de hottes HA sont accostées dans la même cellule via un système d'adaptation de type barillet (option de base pour le chiffrage devant être confortée par les études plus détaillées) ;
- Le classement en FIIA-C2 de la salle de chargement des hottes permet la suppression des sas (la prévention des risques de chute du colis ou la limitation de leurs effets sont intégrés par conception) ;
- L'accostage par étanchéité statique et dynamique entre les hottes et la salle d'accostage est retenu ;
- Les cellules de déchargement des hottes, permettant le cas échéant de récupérer les colis de l'installation souterraine, ont été réaménagées.

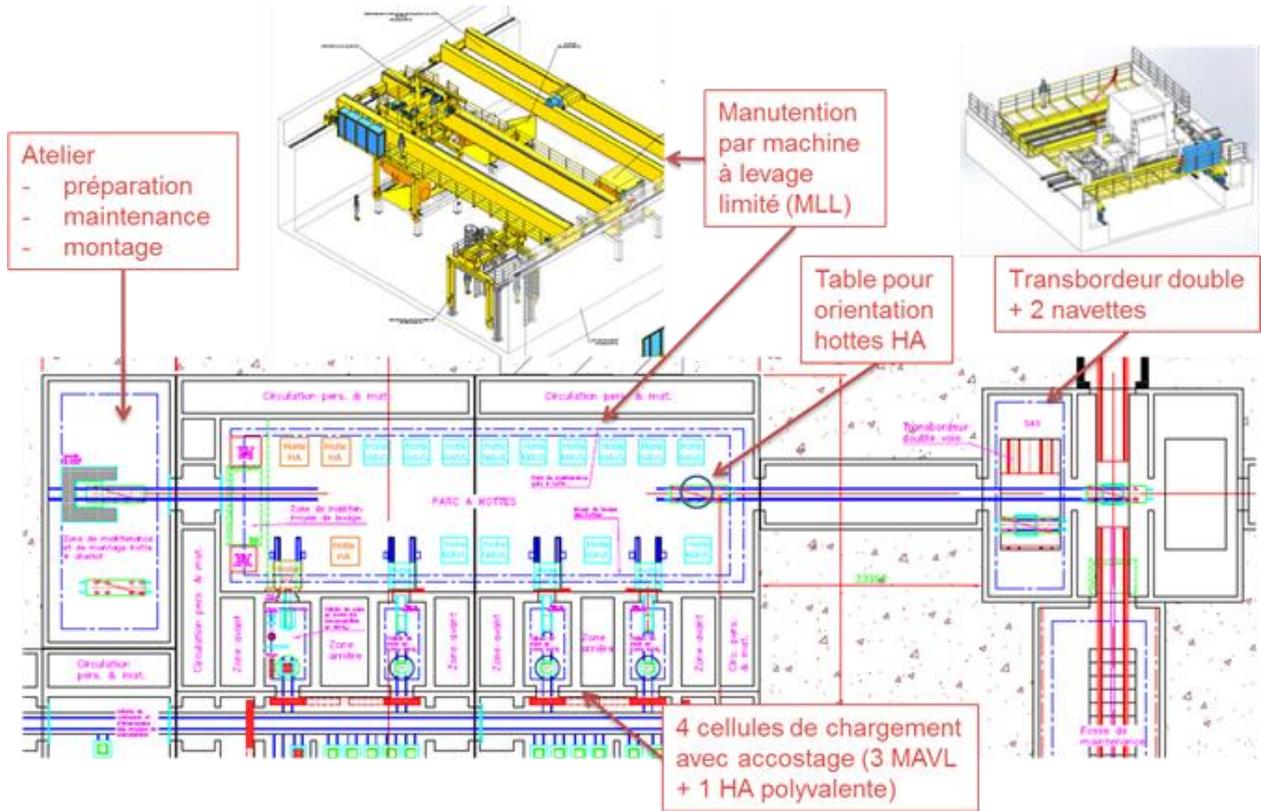


Figure 12 - Zone des hottes

2.2.2.10 Traitement des non-conformités (NC)

- La filière déchets a été revue et offre une possibilité d'accoster des colis de stockage à la zone de garage pont des cellules de traitement, permettant d'évacuer les déchets de ces cellules via un accostage statique.

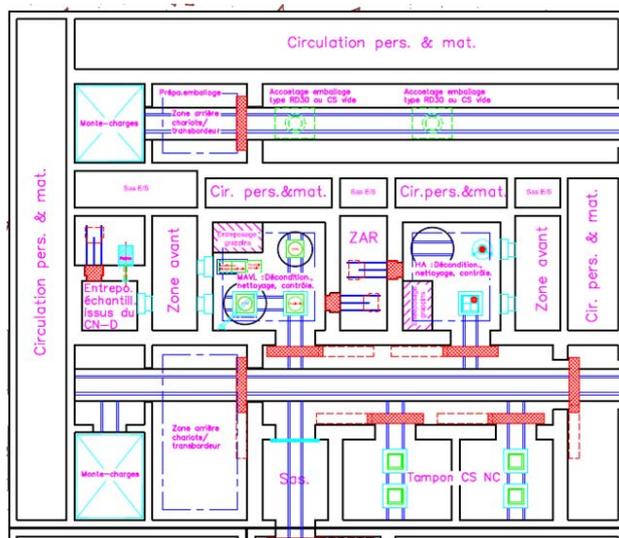


Figure 13 - Zone Traitement des NC

2.2.2.11 Contrôles 2nd niveau

- Suppression des contrôles de 2nd niveau redondants avec contrôles en ligne (débit de dose, contamination surfacique, masse, ...).

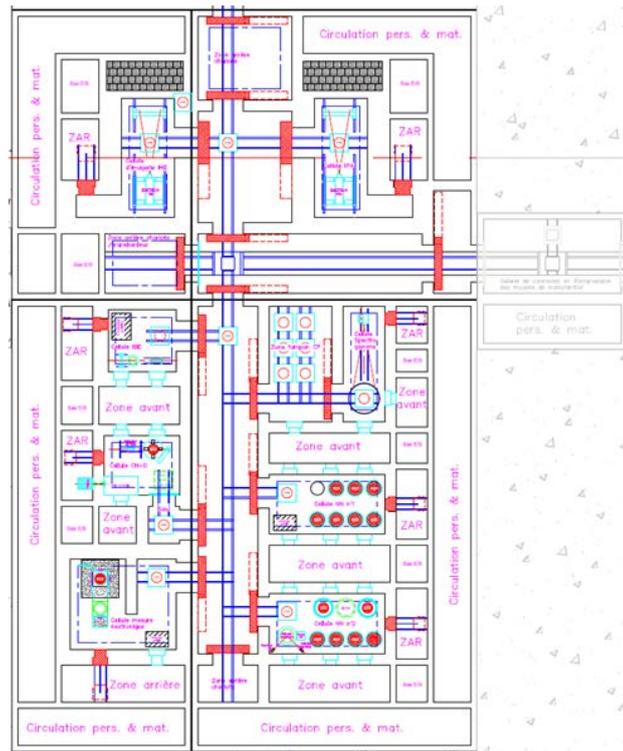


Figure 14 - Zone des Contrôles 2nd Niveau

2.3 Synthèse des caractéristiques

Les principales caractéristiques du bâtiment nucléaire EP1 retenues en référence pour le chiffrage 2014 sont les suivantes :

- Surface développée : 93 868 m² (dont 10 900 m² en charpente métallique - Bloc 22) ;
- Volume du bâtiment : 901 171 m³ ;
- Volume de béton (y/c radier) : 260 086 m³ ;
- Volume ventilé : 644 295 m³.

Par rapport aux hypothèses retenues pour le chiffrage 2013, la conception J_{aps} 03b apporte un gain de l'ordre de 37% sur le volume de béton.

La conception du bâtiment EP1 est maintenant décomposée en blocs. Le tableau ci-après fournit le détail des surfaces et volumes affectés aux différents blocs.

Blocs : Fonctions/métiers		Surface développée (m ²)	Volume bâtiment y/c radier (m ³)	Volume béton y/c radier (m ³)	Volume ventilé (m ³)
bloc 1	Réception, préparation et déchargement des emballages	2 500	47 500	11 814	35 686
bloc 2	Tampon conteneurs hors GC nucléaire et Tampon conteneurs dans GC nucléaire	1 694	29 150	5 706	23 444
bloc 3	Réception, préparation et déchargement des emballages : 90%	5 195	46 300	17 613	28 687
	Contrôle et tampon CP : 10%				
bloc 4	Tampon conteneurs hors/dans GC nucléaire	4 698	44 900	16 332	28 568
bloc 5	Tampon conteneurs hors/dans GC nucléaire : 60%	5 358	36 360	12 887	23 473
	Contrôle et tampon CP : 40%				
bloc 6	Contrôle et tampon CP	4 057	33 820	13 742	20 078
bloc 7		4 239	28 765	13 287	18 688
bloc 8	Conditionnement des CP MAVL en CS	4 624	34 835	13 440	21 395

Blocs : Fonctions/métiers		Surface développée (m ²)	Volume bâtiment y/c radier (m ³)	Volume béton y/c radier (m ³)	Volume ventilé (m ³)
	Conditionnement des CP HA en CS				
bloc 9	Contrôle et tampon CS	4 800	32 400	13 738	18 662
bloc 10	Contrôle et tampon CS	3 960	26 796	10 720	16 076
bloc 11	Tampon hottes	5 035	49 655	15 182	34 473
bloc 12	Tampon hottes	3 690	34 632	13 468	21 164
bloc 13					
bloc 14	Contrôles de second niveau	3 156	22 093	9 274	12 819
bloc 15		4 944	35 068	14 161	20 907
bloc 16		1 738	14 122	6 509	7 613
bloc 17		3 533	27 000	11 989	15 011
bloc 18	Filière déchets	10 836	75 288	30 286	45 002
bloc 19	Divers (salle de conduite, utilités, maintenance...)	6 552	71 297	22 627	48 670
bloc 20		231	800	745	55
bloc 21	Réception et chargement / déchargement des convois	2 128	14 460	4 656	9 804
bloc 22		10 900	195 930	1 908	194 022
TOTAL		93 868	901 171	260 086	644 295

Tableau 1 – Synthèse des principales caractéristiques du bâtiment nucléaire EPI

La surface développée (m²) correspond aux surfaces totales additionnées des différents niveaux, évaluées à partir de l'extérieur des murs.

Le volume du hall de réception et chargement / déchargement des convois compte 194 022 m³ ventilé hors réseau ventilation (zone conventionnelle).

Le tableau suivant présente la matrice de conversion par rapport à l'ancienne décomposition fonctionnelle. Les anciennes surfaces et les anciens volumes sont également rappelés.

Fonctions / Métiers	Surface développée (m ²)	Volume bâtiment (m ³)	Volume béton (m ³)	Volume ventilé (m ³)	Correspondance « Blocs »
Réception et chargement / déchargement des convois	3 920	50 656	1 494	49 162	21 / 22
Tampon emballages de transport	9 584	103 038	3 652	99 387	Sans objet
Réception, préparation et déchargement des emballages	11 040	151 680	39 464	104 710	1 / 90% 3 / 4
Contrôle et tampon CP	14 692	176 304	50 152	116 614	10% 3 / 40% 5 / 6 / 7
Tampon conteneurs hors GC nucléaire	1 400	16 100	533	15 567	2 / 60% 5
Tampon conteneurs dans GC nucléaire	5 250	63 000	17 222	42 502	
Conditionnement des CP MAVL en CS	6 270	75 240	21 847	49 238	8
Conditionnement des CP HA en CS	4 070	48 840	14 181	31 962	
Contrôles de second niveau	11 770	141 240	41 010	92 430	14 / 15 / 16 / 17
Contrôle et tampon CS	25 960	311 520	87 487	207 394	9 / 10
Tampon hottes	9 090	117 268	31 297	80 019	11 / 12
Filière déchets	16 520	198 240	57 078	130 306	18
Divers (salle de conduite, utilités, maintenance...)	16 180	162 191	45 009	108 622	19 / 20
Total fonctions	135 746	1 615 317	410 425	1 127 913	

Tableau 2 – Matrice de conversion « fonctions/blocs » du bâtiment nucléaire EPI

Le tableau suivant donne le détail des volumes ventilés par bloc et par classe de ventilation.

Blocs	Volume ventilé conventionnel (m ³)	Volume ventilé C1 (m ³)	Volume ventilé C2 (m ³)	Volume ventilé C3 (m ³)	Volume ventilé C4 (m ³)	Total (m ³)
Bloc 1	0	35 686	0	0	0	35 686
Bloc 2	23 444	0	0	0	0	23 444
Bloc 3	0	19 875	6 086	2 726	0	28 687
Bloc 4	0	6 467	18 380	0	3 721	28 568
Bloc 5	8 500	7 324	7 649	0	0	23 473
Bloc 6	0	8 744	5 498	670	5 166	20 078
Bloc 7	7 300	2 700	8 688	0	0	18 688
Bloc 8	0	10 631	10 764	0	0	21 395
Bloc 9	0	9 233	9 429	0	0	18 662
Bloc 10	5 190	4 825	6 061	0	0	16 076
Bloc 11	3 480	23 856	7 137	0	0	34 473
Bloc 12	1 350	14 390	5 424	0	0	21 164
Bloc 13						
Bloc 14	0	4 800	6 608	511	900	12 819
Bloc 15	0	8 351	12 556	0	0	20 907
Bloc 16	0	4 981	2 632	0	0	7 613
Bloc 17	0	8 583	6 428	0	0	15 011
Bloc 18	0	23 420	15 602	1 745	4 235	45 002
Bloc 19	0	48 670	0	0	0	48 670
Bloc 20	55	0	0	0	0	55
Bloc 21	0	6 892	2 912	0	0	9 804
Total	49 319	249 427	131 853	5 652	14 022	450 273

Tableau 3 - Volumes ventilés par bloc et par classe de ventilation

2.4 Liste des équipements

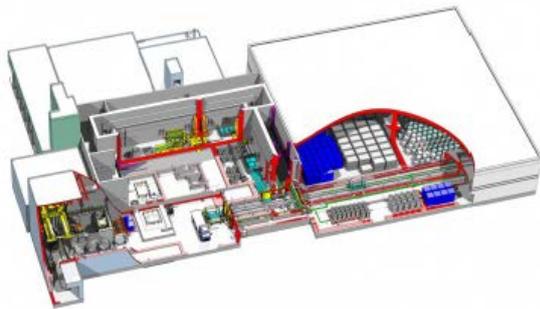
La liste des équipements complétée des coûts est présentée en annexe 4.

3. Méthodologie de chiffrage

Le chiffrage est présenté aux conditions économiques de janvier 2012 et tous les coûts sont présentés hors taxe.

3.1 Investissement initial

Les coûts unitaires sont issus des bases de coûts de la MOe-S qui consolident l'ensemble des projets menés par les entreprises du groupement (marché de conception/réalisation de l'installation ICEDA sur le site EDF du Bugey, ...).



Projet ICEDA - EDF/CIDEN - Installations de conditionnement et d'entreposage de déchets activés - Le Bugey

Projet Icéda

Installation implantée sur le site de la centrale du Bugey et qui permettra de conditionner et d'entreposer, à partir de fin 2013 - début 2014, des déchets issus du démantèlement des 9 coeurs de réacteurs EDF. Pour ce projet, Ingérop assure un rôle de concepteur d'ensemble, de maître d'oeuvre particulier et de coordonateur des études.

Tout au long de la phase esquisse, le chiffrage de la MOe-S a fait l'objet de plusieurs niveaux d'évaluation :

- Contrôle par la cellule d'estimation de l'Andra ;
- Audit des méthodes et des outils par la société PwC ;
- Benchmark par rapport à d'autres références (REX des producteurs EDF, CEA et Areva) dans le cadre de la revue des coûts unitaires d'investissement sur la base de J_{esq} 4.

3.2 Cas du prix unitaire du m³ de béton

La méthodologie utilisée pour chiffrer le poste génie civil (gros œuvre et second œuvre) s'appuie sur des prix unitaires composites en fonction de l'ouvrage à réaliser. Le tableau suivant présente les prix de m³ de béton retenus.

Type d'ouvrage	PU (€/m ³)
Radier	980
Voile	1 777
Plancher	1 628
Terrasse	1 628

Prix moyen macroscopique	1 500
---------------------------------	--------------

Tableau 4 - Prix du m³ de béton par typologie d'ouvrage

Nb : le prix moyen de 1 500 €/m³ est donné à titre indicatif. Le chiffrage quant à lui est bâti à partir des prix unitaires par typologie d'ouvrage présentés dans le tableau.

3.3 Maîtrise d'œuvre, maîtrise d'ouvrage et AMO réglementaires

Les hypothèses de chiffrage sont présentées dans la note « Estimation du coût de base de maîtrise d'œuvre et de maîtrise d'ouvrage », le tableau suivant présente les taux retenus.

Tranches	Types	Ratios
T1	MOe de conception	Intégrées au PMT et présentées dans la note MOe/MOA
	MOA	
	AMO réglementaires	
	MOe de réalisation	20%
Tu	MOe de conception	2%
	MOA	3%
	AMO réglementaires	0.5%
	MOe de réalisation (y/c jouvence et démantèlement)	20% ¹

Tableau 5 - Taux de MOe, MOA et AMO réglementaires

3.4 Démantèlement

Les coûts de démantèlement sont établis à partir de ratios appliqués aux postes de M&T, hors essais de qualification.

En s'appuyant sur les éléments de REX fournis par les producteurs, la valeur retenue pour le chiffrage est de 10%.

3.5 Jouvence

Le schéma directeur de jouvence a fait l'objet d'une optimisation afin de limiter le renouvellement des équipements.

Ainsi, les équipements mécaniques sont considérés dimensionnés pour la durée de vie du bâtiment (de l'ordre de 70 ans), de même que certains équipements électriques de puissance.

Enfin, il est considéré que les équipements en fin de vie ne sont pas remplacés si la durée d'exploitation résiduelle du bâtiment est inférieure à 25% de la durée de vie des matériels. A ce stade, l'impact en termes de renforcement de la maintenance pour ces équipements n'a pas été évalué mais devra faire l'objet d'instruction en phase d'avant-projet.

Les coûts de jouvence sont décomposés par corps de métier et correspondent au total des jouvences sur la durée de vie de chaque bâtiment.

3.6 Pièces de rechange

A ce stade des études, le montant annuel des pièces de rechange est estimé sur la base de ratios par nature de poste. Le tableau suivant présente les ratios appliqués.

Nature de poste	Ratio
Mécanique	0.50%
Electricité / Conduite / Ventilation / Tuyauterie / Second œuvre	0.25%
Autres corps de métier	0.00%

Tableau 6 - Ratios appliqués par nature de poste pour les pièces de rechange

¹ Les études et la réalisation des bâtiments EP1 et EP2 étant différentes, l'effet de répétitivité ayant pour conséquence la réduction du ratio de MOe de réalisation lors des tranches ultérieures, ne peut pas être retenu.

4. Estimation du coût de base

L'estimation du coût de base est réalisée par la MOe-S à partir de données fournies par les différentes MOe-SS pour chacun des sous-systèmes. Ce chapitre synthétise le coût de base associé au périmètre du sous-système 2 « bâtiments nucléaires de surface ».

Certains coûts présentés ici à titre indicatif sont consolidés dans des notes de chiffrage distinctes Il s'agit en particulier :

- Des coûts de MOe, de MOA et d'AMO réglementaires (note dédiée) ;
- Des coûts de pièces de rechange (remontés dans le chiffrage de l'exploitation).

4.1 Périmètre et limites de prestations

Sont inclus dans cette estimation

- La construction de l'installation EP1 hors bloc 3 (tranche 1) ;
- La construction du bloc 3 de l'installation EP1 (autres tranches de construction) ;
- La construction de l'installation EP2 (autres tranches de construction) ;
- Le démantèlement en fin de vie pour chacune de ces installations ;
- La jouvence : renouvellement des équipements au sein de chacune de ces installations.

Les coûts présentés comprennent :

- Les VRD spécifiques au bâtiment nucléaire (les VRD généraux du site sont compris dans les coûts des installations conventionnelles de surface - SS5) ;
- Le coût de construction des différents blocs de génie civil du bâtiment et des éléments en charpente métallique (gros œuvre et second œuvre) ;
- L'équipement du bâtiment :
 - ✓ Ventilation : en fonction du volume ventilé et du prix unitaire moyen en distinguant ventilation conventionnelle et ventilation nucléaire ;
 - ✓ Electricité et conduite : au pro-rata du poste « équipements mécaniques » basé sur une étude analytique réalisée à J_{esq} 05 ;
 - ✓ Tuyauterie : selon un ratio lié au volume du bâtiment.
- Les équipements du procédé au sein du bâtiment (mécanique), y compris les équipements liés aux contrôles des colis ;
- Le merlonnage (couverture) du niveau haut du bâtiment ;
- Les frais de chantier spécifiques au bâtiment nucléaire (éclairage et CFI du chantier).

Sont exclus de cette estimation

- Les coûts de maîtrise d'œuvre de conception du bâtiment EP1 (hors bloc 3) ;
- Les coûts de maîtrise d'ouvrage en tranche 1 (EP1 hors bloc 3) ;
- Les coûts associés aux organismes de contrôles réglementaires (AMO réglementaires) en tranche 1 (EP1 hors bloc 3) ;
- Les aléas de réalisation ;
- Les assurances, les impôts et taxes.

4.2 Investissement de la tranche 1

Le tableau ci-dessous synthétise la décomposition des coûts d'investissement de la tranche 1 (bâtiment EP1 hors bloc 3) aux conditions économiques de 2012, présentés par fonction et par bloc.

Fonctions / Métiers	Total	Gros œuvre	Second œuvre	Mécanique	Electricité	Conduite	Ventilation	Tuyauterie
Bloc 1	36 M€	15.3 M€	2.8 M€	7.3 M€	1.1 M€	0.6 M€	8.3 M€	0.6 M€
Bloc 2	15 M€	7.3 M€	1.4 M€	2.7 M€	0.4 M€	0.2 M€	3.1 M€	0.3 M€
Bloc 3		Construction différée en Tu						
Bloc 4	76 M€	21.8 M€	4.0 M€	34.5 M€	5.2 M€	2.8 M€	6.6 M€	0.5 M€
Bloc 5	31 M€	16.7 M€	3.1 M€	5.0 M€	0.7 M€	0.4 M€	4.6 M€	0.4 M€
Bloc 6	76 M€	18.2 M€	3.4 M€	40.0 M€	6.0 M€	3.2 M€	4.7 M€	0.4 M€
Bloc 7	38 M€	17.4 M€	3.2 M€	11.1 M€	1.7 M€	0.9 M€	3.6 M€	0.3 M€
Bloc 8	45 M€	17.8 M€	3.3 M€	14.9 M€	2.2 M€	1.2 M€	5.0 M€	0.4 M€
Bloc 9	48 M€	18.2 M€	3.4 M€	17.4 M€	2.6 M€	1.4 M€	4.3 M€	0.4 M€
Bloc 10	29 M€	14.1 M€	2.6 M€	7.2 M€	1.1 M€	0.6 M€	3.2 M€	0.3 M€
Bloc 11	59 M€	20.0 M€	3.7 M€	22.4 M€	3.3 M€	1.8 M€	7.6 M€	0.6 M€
Bloc 12	43 M€	17.9 M€	3.3 M€	13.4 M€	2.0 M€	1.1 M€	4.8 M€	0.4 M€
Bloc 13		Regroupement fonctionnel abandonné en cours de conception lors de la phase d'optimisation						
Bloc 14	20 M€	11.9 M€	2.2 M€	2.1 M€	0.3 M€	0.2 M€	3.0 M€	0.3 M€
Bloc 15	126 M€	18.0 M€	3.3 M€	80.6 M€	12.0 M€	6.5 M€	4.9 M€	0.4 M€
Bloc 16	14 M€	8.4 M€	1.6 M€	1.9 M€	0.3 M€	0.2 M€	1.8 M€	0.2 M€
Bloc 17	28 M€	15.4 M€	2.9 M€	4.6 M€	0.7 M€	0.4 M€	3.5 M€	0.3 M€
Bloc 18	141 M€	39.8 M€	7.4 M€	66.8 M€	10.0 M€	5.4 M€	10.4 M€	0.9 M€
Bloc 19	48 M€	29.8 M€	5.5 M€	0.5 M€	0.1 M€	0.0 M€	11.3 M€	0.9 M€
Bloc 20	3 M€	1.0 M€	0.2 M€	1.8 M€	0.3 M€	0.1 M€	0.0 M€	0.0 M€
Bloc 21	10 M€	5.7 M€	1.1 M€	0.5 M€	0.1 M€	0.0 M€	2.3 M€	0.2 M€
Bloc 22	75 M€	8.8 M€	1.6 M€	52.7 M€	7.9 M€	4.3 M€	0.0 M€	0.0 M€
Total fonctions	961 M€	324 M€	60 M€	387 M€	58 M€	31 M€	93 M€	8 M€
<i>Provisions pour VRD (y/c merlonnage)</i>	17.9 M€							
Total	979 M€							
<i>Frais de chantier</i>	6.7 M€							
Total M&T (yc transverses)	986 M€							
<i>MOe de conception</i>								
<i>MOe de réalisation</i>	197.1 M€							
Total MOe	197 M€							
<i>AMO réglementaires</i>								
<i>MOA</i>								
Total MOA	0 M€							
TOTAL	1 183 M€							

Tableau 7 - Décomposition du coût d'investissement du bâtiment nucléaire EP1

Pour les investissements à réaliser en tranche 1, les coûts de MOe de conception, de MOA et d'AMO réglementaires sont traités globalement et non à l'échelle de chaque sous-système (cf. note « Estimation du coût de base de maîtrise d'œuvre et de maîtrise d'ouvrage »).

4.3 Autres tranches de construction

4.3.1 Bâtiment EP1 – Bloc 3

Pour ce qui concerne les installations nucléaires de surface, ce poste traite de la construction du bloc 3 du bâtiment EP1 dédié au déchargement des emballages de type horizontaux et dont la mise en service est programmée en 2052.

Le tableau ci-dessous synthétise la décomposition des coûts d'investissement des tranches ultérieures aux conditions économiques de 2012, présentés par fonction et par corps de métier.

Fonctions / Métiers	Total	Gros œuvre	Second œuvre	Mécanique	Electricité	Conduite	Ventilation	Tuyauterie
<i>Bloc 3 : Réception et chargnt / déchargnt convois</i>	54 M€	20.8 M€	3.8 M€	18.8 M€	2.8 M€	1.5 M€	6.0 M€	0.5 M€
<i>Bloc 3 : Contrôle et tampon CP</i>	6 M€	2.3 M€	0.4 M€	2.1 M€	0.3 M€	0.2 M€	0.7 M€	0.1 M€
Total fonctions	60 M€	23 M€	4 M€	21 M€	3 M€	2 M€	7 M€	1 M€
<i>Provisions pour VRD (y/c merlonnage)</i>	1.0 M€							
Total	61 M€							
<i>Frais de chantier</i>	0.4 M€							
Total M&T (yc transverses)	62 M€							
<i>MOe de conception</i>	1 235 k€							
<i>MOe de réalisation</i>	12.3 M€							
Total MOe	14 M€							
<i>AMO réglementaires</i>	309 k€							
<i>MOA</i>	1 852 k€							
Total MOA	2 M€							
TOTAL	77 M€							

Tableau 8 - Décomposition du coût d'investissement du bâtiment nucléaire EP1 (bloc 3)

4.3.2 Bâtiment EP2

Pour ce qui concerne les installations nucléaires de surface, ce poste traite de la construction du bâtiment EP2 dont la mise en service est programmée en 2079. Il sera dédié à la gestion des colis de déchets HA1/2.

Les études menées pour le jalon J_{aps} 3b n'incluaient pas le bâtiment EP2 dans leur périmètre. Le gain potentiel de l'application d'optimisations sur ce bâtiment est intégré dans le registre des opportunités.

Le tableau ci-dessous synthétise la décomposition des coûts d'investissement des tranches ultérieures aux conditions économiques de 2012, présentés par fonction et par corps de métier.

Fonctions / Métiers	Total	Gros œuvre	Second œuvre	Mécanique	Electricité	Conduite	Ventilation	Tuyauterie
<i>Réception et chargement / déchargement des convols</i>	30 M€	1.3 M€	2.3 M€	24.8 M€	0.9 M€	0.0 M€	0.2 M€	0.1 M€
<i>Tampon emballages de transport</i>	12 M€	0.7 M€	1.2 M€	9.4 M€	0.5 M€	0.0 M€	0.1 M€	0.1 M€
<i>Réception, préparation et déchargement des emballages</i>	72 M€	35.0 M€	9.0 M€	7.0 M€	6.6 M€	2.5 M€	11.5 M€	0.4 M€
<i>Contrôle et tampon CP</i>	131 M€	46.2 M€	5.7 M€	59.6 M€	5.3 M€	2.5 M€	10.7 M€	0.6 M€
<i>Tampon conteneurs hors GC nucléaire</i>	0 M€	0.0 M€	0.0 M€	0.0 M€	0.0 M€	0.0 M€	0.0 M€	0.0 M€
<i>Tampon conteneurs dans GC nucléaire</i>	17 M€	8.1 M€	1.3 M€	3.6 M€	0.8 M€	0.5 M€	2.7 M€	0.1 M€
<i>Conditionnement des CP MAVL en CS</i>	0 M€	0.0 M€	0.0 M€	0.0 M€	0.0 M€	0.0 M€	0.0 M€	0.0 M€
<i>Conditionnement des CP HA en CS</i>	156 M€	45.0 M€	12.5 M€	75.6 M€	9.5 M€	2.5 M€	10.4 M€	0.5 M€
<i>Contrôles de second niveau</i>	83 M€	5.4 M€	0.9 M€	73.3 M€	0.9 M€	0.4 M€	1.7 M€	0.1 M€
<i>Contrôle et tampon CS</i>	115 M€	44.6 M€	5.4 M€	46.1 M€	5.2 M€	2.5 M€	10.3 M€	0.5 M€
<i>Tampon hottes</i>	36 M€	23.6 M€	3.6 M€	0.0 M€	3.1 M€	1.2 M€	3.9 M€	0.3 M€
<i>Fillière déchets</i>	51 M€	0.0 M€	0.0 M€	50.6 M€	0.0 M€	0.0 M€	0.0 M€	0.0 M€
<i>Divers (utilités, maintenance, issues...)</i>	1 M€	0.0 M€	0.0 M€	1.2 M€	0.0 M€	0.0 M€	0.0 M€	0.0 M€
Total fonctions	702 M€	210 M€	42 M€	351 M€	33 M€	12 M€	52 M€	3 M€
<i>Provisions pour VRD (y/c merlonnage)</i>	9.1 M€							
Total	711 M€							
<i>Frais de chantier</i>	3.8 M€							
Total M&T (yc transverses)	715 M€							
<i>MOe de conception</i>	14.3 M€							
<i>MOe de réalisation</i>	143.0 M€							
Total MOe	157 M€							
<i>AMO réglementaires</i>	3.6 M€							
<i>MOA</i>	21 447 k€							
Total MOA	25 M€							
TOTAL	897 M€							

Tableau 9 - Décomposition du coût d'investissement du bâtiment nucléaire EP2

4.4 Jouvence

Les tableaux ci-dessous synthétisent la décomposition des coûts de jouvence des bâtiments EP1 et EP2 aux conditions économiques de 2012, présentés par fonction et par corps de métier.

	EP1 (hors bl.3)	EP1 Bloc 3	EP2	Total
<i>Gestion du chantier</i>	0.0 M€	0.0 M€	0.0 M€	0 M€
<i>VRD</i>	1.0 M€	0.1 M€	0.0 M€	1 M€
<i>Merlonage</i>	0.0 M€	0.0 M€	0.0 M€	0 M€
<i>Gros œuvre</i>	0.0 M€	0.0 M€	0.1 M€	0 M€
<i>Second œuvre</i>	2.8 M€	0.1 M€	1.3 M€	4 M€
<i>Mécanique</i>	29.6 M€	1.7 M€	50.3 M€	82 M€
<i>Electricité</i>	160.6 M€	4.0 M€	48.5 M€	213 M€
<i>Conduite</i>	122.5 M€	2.2 M€	41.7 M€	166 M€
<i>Ventilation</i>	241.5 M€	8.7 M€	57.8 M€	308 M€
<i>Tuyauterie</i>	0.4 M€	0.0 M€	0.0 M€	0 M€
M&T Jouvence	558 M€	17 M€	200 M€	775 M€
<i>MOe de conception</i>	11.2 M€	0.3 M€	4.0 M€	15 M€
<i>MOe de réalisation</i>	111.7 M€	3.4 M€	40.0 M€	155 M€
Total MOe	123 M€	4 M€	44 M€	170 M€
<i>AMO réglementaires</i>	2.8 M€	0.1 M€	1.0 M€	4 M€
<i>MOA</i>	16.8 M€	0.5 M€	6.0 M€	23 M€
Total MOA	20 M€	1 M€	7 M€	27 M€
TOTAL	701 M€	21 M€	251 M€	973 M€

Tableau 10 - Décomposition du coût de jouvence des bâtiments EP1 et EP2

4.5 Démantèlement

Les coûts de démantèlement sont estimés à 10% des coûts de construction selon des REX fournis par les producteurs.

Le tableau ci-dessous synthétise la décomposition des coûts de démantèlement des bâtiments EP1 et EP2 aux conditions économiques de 2012.

	EP1 (y/c bl.3)	EP2	Total
<i>M&T investissement (pour mémoire)</i>	1 047.4 M€	714.9 M€	1 762 M€
M&T démantèlement	105 M€	71 M€	176 M€
<i>MOe de conception</i>	2.1 M€	1.4 M€	4 M€
<i>MOe de réalisation</i>	20.9 M€	14.3 M€	35 M€
Total MOe	23 M€	16 M€	39 M€
<i>AMO réglementaires</i>	0.5 M€	0.4 M€	1 M€
<i>MOA</i>	3.1 M€	2.1 M€	5 M€
Total MOA	4 M€	3 M€	6 M€
Total	131 M€	90 M€	221 M€

Tableau 11 - Décomposition du coût de démantèlement des bâtiments EP1 et EP2

4.6 Pièces de rechange

Le tableau ci-dessous synthétise la décomposition des coûts de pièces de rechange aux conditions économiques de 2012.

	Assiette EP1 (y/c bl.3)	Assiette EP2	pDR EP1 (y/c bl.3)	pDR EP2	Total
<i>Pièces de rechange</i>	541.5 M€	421.7 M€	188.9 M€	139.1 M€	328 M€

Tableau 12 - Tableau de synthèse des coûts de pièces de rechange

4.7 Synthèse des investissements

Le tableau suivant synthétise l'ensemble des investissements présentés en rappelant les coûts de MOe, de MOA et d'AMO réglementaires.

	T1 (hors bl.3)	T1 Bloc 3	Tu	Déman- tèlement	Jouvence	Total
Total M&T	986 M€	62 M€	715 M€	176 M€	775 M€	2 714 M€
<i>MOe de conception</i>		1.2 M€	14.3 M€	3.5 M€	15.5 M€	35 M€
<i>MOe de réalisation</i>	197.1 M€	12.3 M€	143.0 M€	35.2 M€	155.0 M€	543 M€
Total MOe	197 M€	14 M€	157 M€	39 M€	170 M€	577 M€
<i>AMO réglementaires</i>		0.3 M€	3.6 M€	0.9 M€	3.9 M€	9 M€
<i>MOA</i>		1.9 M€	21.4 M€	5.3 M€	23.2 M€	52 M€
Total MOA		2 M€	25 M€	6 M€	27 M€	60 M€
Total	1 183 M€	77 M€	897 M€	221 M€	973 M€	3 351 M€

Tableau 13 - Synthèse des investissements

4.8 Analyse des écarts entre J_{esq} 05 et J_{aps} 03b

Le tableau ci-dessous présente de manière synthétique les écarts entre le chiffrage fin 2013 et le chiffrage J_{aps} 3b.

Investissements	Jesq05 (M€)	Japs03b (M€)	Ecarts (M€)	Commentaires
M&T EP1 (y compris bloc 3)	1 544	1 047	-497	Optimisation du bâtiment : <ul style="list-style-type: none"> -41 878 m² de surface développée ; -910 076 m³ de volume de bâtiment ; -229 227 m³ de volume de béton ; Réduction des différents postes (équipements, tuyauteries, électricité, ...).
Sous total T1	1 544	1 047	-497	
M&T EP2	715	715	0	Pas de modification de la conception de base de l'installation. Optimisations chiffrées en opportunités.
Jouvence EP1	422	575	+153	Allongement de la durée de vie de l'EP1 (plus de 10 ans) nécessitant une jouvence supplémentaire de certains équipements.
Jouvence EP2	200	200	0	Pas de modification de la conception de base de l'installation.
Démantèlement EP1	154	105	-49	Optimisation du bâtiment (en lien direct avec le poste M&T).
Démantèlement EP2	71	71	0	Pas de modification de la conception de base de l'installation.
Sous total Tu	1 562	1 666	+104	
TOTAL	3 106	2 713	-393	

Tableau 14 - Analyse des écarts

4.9 Chronique de dépenses

La chronique de dépenses est calculée selon les hypothèses décrites dans la note « Hypothèses économiques et calendaires ». Elle est ainsi caractérisée par plusieurs périodes :

- 2021 - 2026 : investissement de la tranche 1 : bâtiment EP1 hors bloc 3 (jusqu'à 198 M€/an) ;
- 2027 - 2043 : exploitation de EP1 (pas de coût d'investissement) ;
- 2044 - 2046 : jouvence des lots techniques et du second œuvre d'EP1 (11 M€/an) ;
- 2047-2051 : jouvence des lots techniques et du second œuvre d'EP1 (11 M€/an) et construction du bloc 3 du bâtiment EP1 (12 M€/an) ;
- 2052 - 2068 : jouvence des lots techniques et du second œuvre d'EP1 (11 à 12 M€/an) ;
- 2069 - 2078 : construction d'EP2, opérations de jouvence des lots techniques et du second œuvre sur EP1 (83 M€/an) ;
- 2079 - 2093 : jouvence des lots techniques et du second œuvre d'EP1 (12 M€/an) ;
- 2094 - 2094 : jouvence des lots techniques et du second œuvre d'EP1 et d'EP2 (16 M€/an) ;
- 2095 - 2099 : jouvence des lots techniques et du second œuvre d'EP2 (4 M€/an) ;
- 2100 - 2109 : démantèlement d'EP1, opérations de jouvence des lots techniques et du second œuvre sur EP2 (15 M€/an) ;
- 2110 - 2139 : jouvence des lots techniques et du second œuvre d'EP2 (4 M€/an) ;
- 2140 - 2144 : arrêt des opérations de jouvence sur EP2 en vue de l'arrêt de l'installation (pas de coût d'investissement) ;
- 2145 - 2154 : démantèlement d'EP2 (7 M€/an).

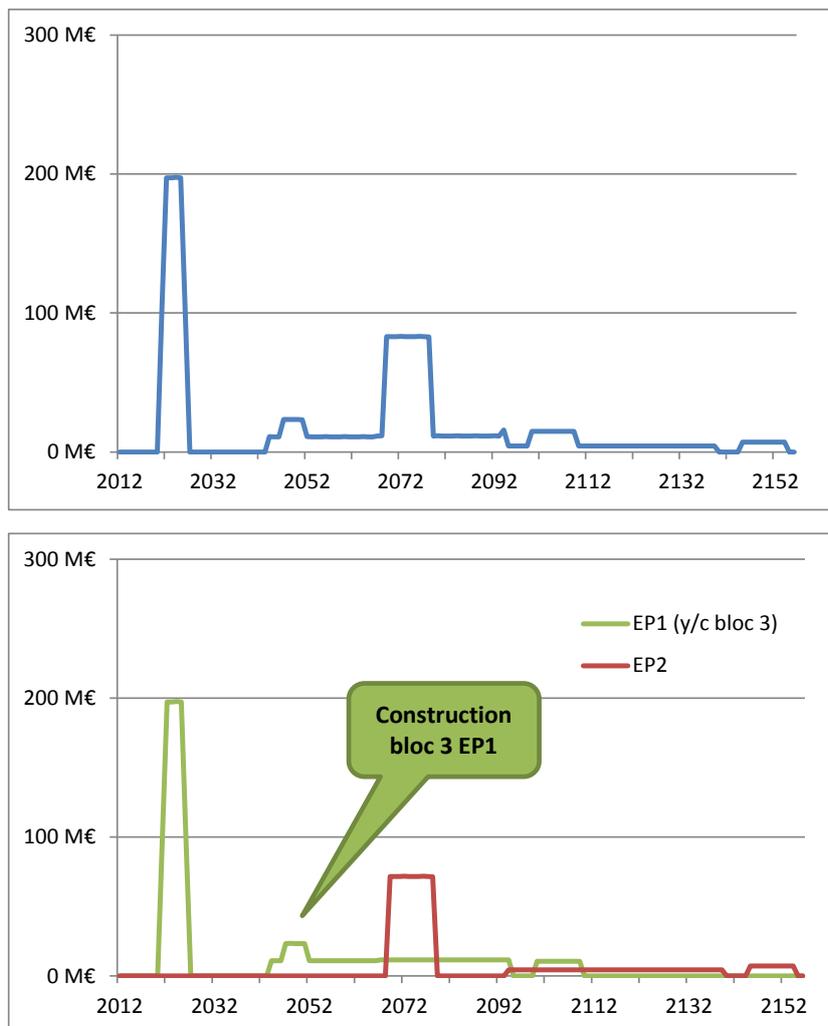
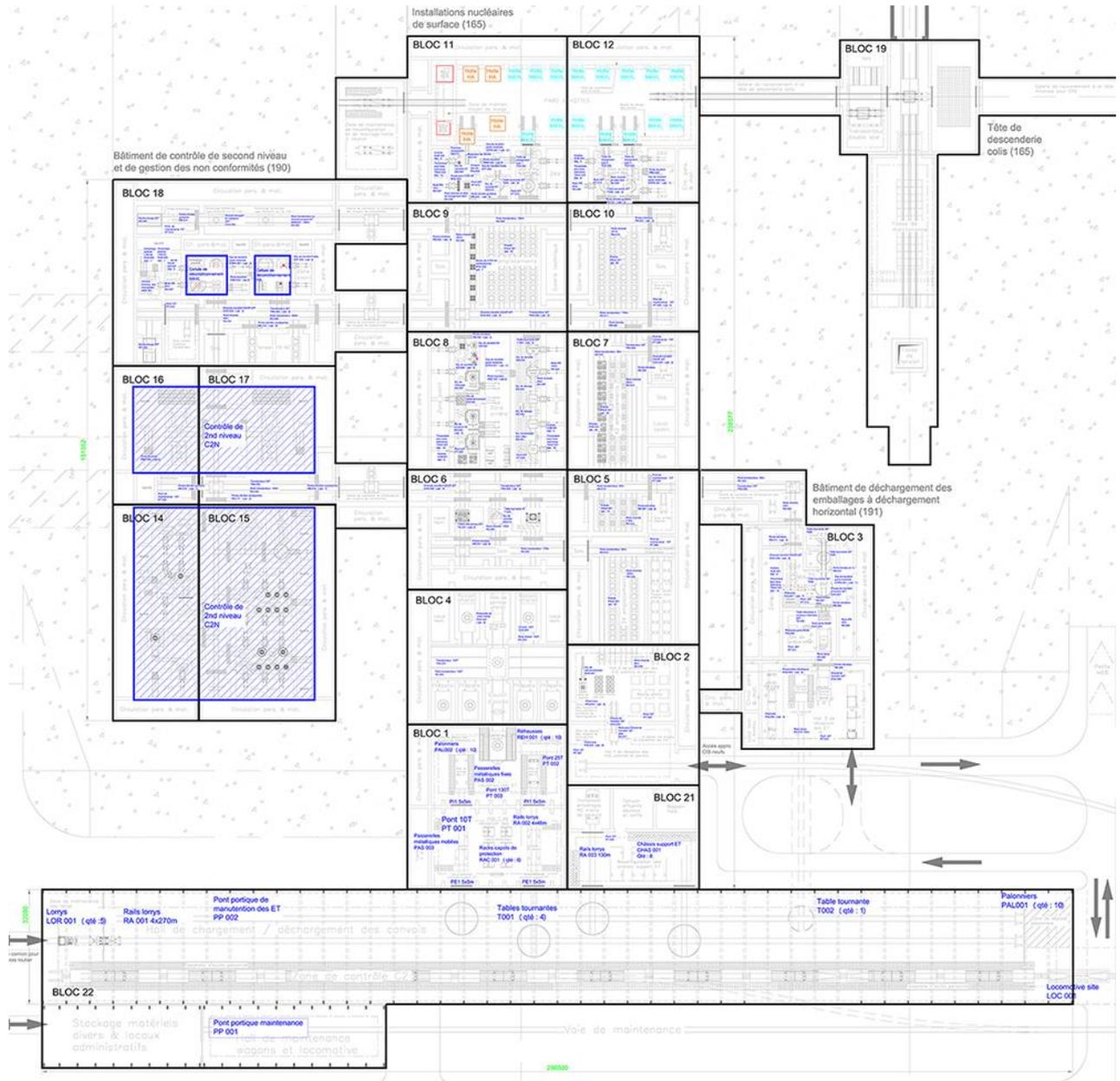


Figure 15 - Chronogramme des dépenses pour le coût de base, total annuel et par installation

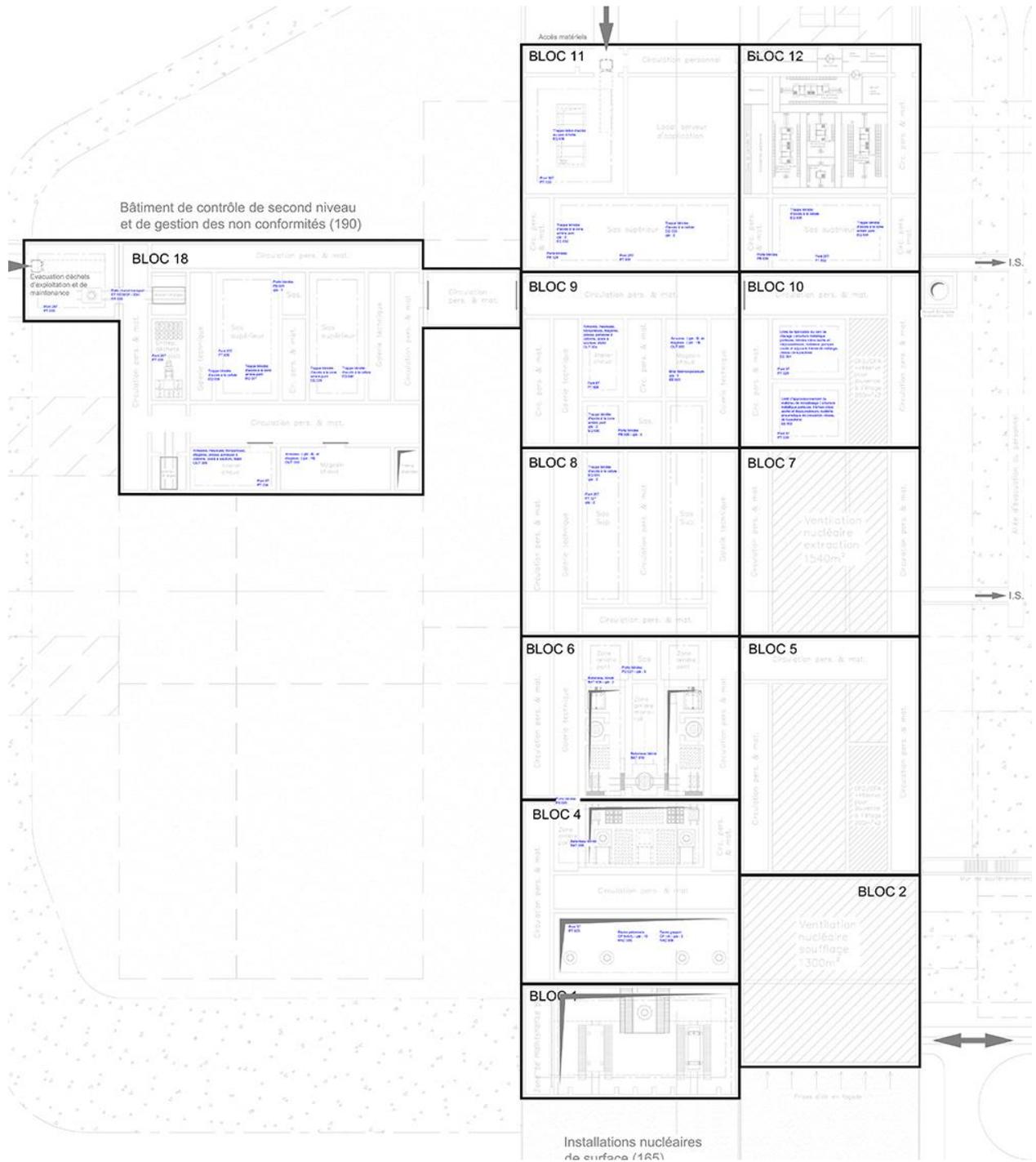
Annexe 1 : Plan de repérage des équipements niveau 0



Annexe 2 : Plan de repérage des équipements niveau +6



Annexe 3 : Plan de repérage des équipements niveau +12



Annexe 4 : Liste des équipements

Désignation	Bloc	Fonction	Qté	Unité	Poids total (kg)	Coût M&T total (k€)
Passerelle de visite ET (mobile)	bloc 01	hall 1 de réception	1	u	3000	61
Pont roulant (Non nucléarisé)	bloc 01	hall 1 de réception	1	u	15000	474
Porte d'accès extérieure	bloc 01	hall 1 de réception	2	u		71
Rack de dépose des capots (1 rack pour 2 capots)	bloc 01	hall 1 de réception	6	u	15900	433
rails pour lorry motorisé (m)	bloc 01	hall 1/2 de réception	185	m	92500	164
Palonnier + rack	bloc 01	Hall 2 de réception	8	u	12000	2368
Passerelle de visite	bloc 01	hall 2 de réception	1	u	12000	245
Pont roulant (Non nucléarisé)	bloc 01	hall 2 de réception	1	u	22000	474
Pont roulant (Non nucléarisé)	bloc 01	hall 2 de réception	1	u	205000	2015
Porte d'accès intérieure	bloc 01	hall 2 de réception	2	u		71
Réhausse pour interface ET/chariot de transfert	bloc 01	hall 2 de réception	10	u	5000	130
Châssis support ET	bloc 01	hall de reconfig châssis support ET	8		4000	82
rails pour lorry motorisé (m)	bloc 01	hall de reconfig châssis support ET	130	m	65000	116
Chariot de transfert	bloc 02	Hall 1 de réception des colis de stockage, palettes et paniers	1	u	8000	341
Palonnier + rack	bloc 02	Hall 1 de réception des colis de stockage, palettes et paniers	6	u	9000	533
Pont roulant (Non Nucléarisé)	bloc 02	Hall 1 de réception des colis de stockage, palettes et paniers	1	u	17000	356
rails pour chariot de transfert CMU 13T (m)	bloc 02	Hall 1 de réception des colis de stockage, palettes et paniers	24	m	12000	21
Equipt de démagnétisation	bloc 02	Hall 2 de préparation des colis de stockage, palettes et paniers	1	u		249
Palonnier + rack	bloc 02	Hall 2 de préparation des colis de stockage, palettes et paniers	6	u	9000	533
Pont roulant (Non Nucléarisé)	bloc 02	Hall 2 de préparation des colis de stockage, palettes et paniers	1	u	20000	356
rails pour chariot de transfert CMU 20T CS/CP (m)	bloc 02	Hall 2 de préparation des colis de stockage, palettes et paniers	66	m	33000	59
Table tournante	bloc 03	Cellule de contrôle C5	1		7182	1063
Sas de transfert petits matériels	bloc 03	cellule de déchargement des emballages H	1		0	178
Chariot de transfert à fourches CMU 20T	bloc 03	Cellule de déchargt des emballages	1		10000	427
Grappin + rack	bloc 03	Cellule de déchargt des emballages	7		10500	995

Désignation	Bloc	Fonction	Qté	Unité	Poids total (kg)	Coût M&T total (k€)
Pont roulant: CMU 20T , portée : 15m, long de voie: 2x22,5m, Nucléarisé, acier peint	bloc 03	Cellule de déchargt des emballages	1		22000	1096
Porte d'accès blindée coulissantes en L: larg 3,8m x haut développée 10m x épaisseur 0,8m (protection radio: 0,8m béton à confirmer en APS)	bloc 03	Cellule de déchargt des emballages	1		83904	870
Porte d'accès blindée coulissantes: larg 4m x haut 3m x épaisseur 1,5m (protection radio: 1,5m béton à confirmer en APS)	bloc 03	Cellule de déchargt des emballages	1		49680	515
Table tournante	bloc 03	Cellule de déchargt des emballages	1		7182	1063
rails pour chariot de transfert à fourches CMU 20T (m)	bloc 03	Cellule de déchargt des emballages/ Cellule de contrôle C5/ Cellule de remise en conformité	46	m	23000	41
Chariot de transfert CMU 16T	bloc 03	Cellule de déchargt des emballages/ Sas/ Galerie de connexion	1		8000	341
chariot de transfert CMU 20T CS/CP	bloc 03	Cellule de déchargt des emballages/ Sas/ Galerie de connexion	2		20000	853
rails pour chariot de transfert CMU 20T CS/CP (m)	bloc 03	Cellule de déchargt des emballages/ Sas/ Galerie de connexion	54	m	27000	48
hublot: larg 1,2 m x long 1,2 m x ép 1,5 m (l'ép max du mur de radiopro est considérée)	bloc 03	Cellule de déchargt des emballages/Cellule de contrôle C5/Cellule de remise en conformité/Zone avant	5			2133
rails IPE en plafond (en m, réserve pour possible manutention bras téléopéré)	bloc 03	Cellule de déchargt des emballages/Cellule de contrôle C5/Cellule de remise en conformité/Zone avant	40	m	20000	36
Traversée (réserve pour possible bras téléopéré)	bloc 03	Cellule de déchargt des emballages/Cellule de contrôle C5/Cellule de remise en conformité/Zone avant	10			427
Table tournante	bloc 03	Cellule de remise en conformité	1		7182	1063
rails pour transbordeur CMU 30T (m)	bloc 03	Galerie de connexion	58	m	29000	52
Transbordeur	bloc 03	Galerie de connexion	1		21000	896
Chariot de transfert	bloc 03	hall 3 de réception des ET	1		17500	747
Palonnier + rack	bloc 03	Hall 3 de réception des ET	4	u	6000	356
Passerelle de visite ET (fixe)	bloc 03	hall 3 de réception des ET	1		1650	34

Désignation	Bloc	Fonction	Qté	Unité	Poids total (kg)	Coût M&T total (k€)
Pont roulant (Non Nucléarisé)	bloc 03	hall 3 de réception des ET	1	u	45000	593
Porte d'accès blindée coulissantes: larg 5,2m x haut 4m x épaisseur 1,5m (protection radio: 1,5m béton à confirmer en APS)	bloc 03	hall 3 de réception des ET	1		86112	893
rails pour lorry (m)	bloc 03	hall 3 de réception des ET	140	m	70000	124
Porte d'accès blindée coulissantes: larg 4,8m x haut 4,5m x épaisseur 0,8m (protection radio: 0,8m béton à confirmer en APS)	bloc 03	Sas	2		95385.6	989
Palonnier + rack	bloc 03	Sas de préparation	1	u	1500	89
Pont roulant: >CMU 20T , portée : 13m, long de voie: 2x21m, Nucléarisé, acier peint	bloc 03	Sas de préparation	1		22000	1037
Rack pour porte RD39	bloc 03	Sas de préparation	1		500	14
rails pour chariot de transfert CMU 35T (m)	bloc 03	Sas de préparation	54	m	27000	48
Table élévatrice à rouleaux motorisés	bloc 03	Sas de préparation	1		7000	299
Batardeau blindé zone garage Ponts + 2 x treuils de levage CMU 50T: larg 15m x haut 2,5m x ép 0,35 m (acier) + portillon blindé coulissant motorisé pour passage outils pont: larg 2,5m x haut 2,5m x ép 0,35 m (acier)	bloc 03	Zone arrière pont cellule déchargement	1		120203	1778
Porte blindée d'accès humain Zone Garage Pont	bloc 03	Zone arrière pont cellule déchargement	1		4710	134
Chariot de transfert 8T CP	bloc 04	Cellule de déchargement des emballages type V	2	u	10000	427
Grappins bouchon de cellule (bouchon type gygogne en 3 morceaux à confirmer en APS) + rack	bloc 04	Cellule de déchargement des emballages type V	3		4500	427
Grappins bouchon d'emballage + rack	bloc 04	Cellule de déchargement des emballages type V	12		18000	1706
Grappins CP HA + rack	bloc 04	Cellule de déchargement des emballages type V	3		4500	427
hublot: larg 1,2 m x long 1,2 m x ép 1,5 m (l'ép max du mur de radiopro est considérée)	bloc 04	Cellule de déchargement des emballages type V	6			2560
Palonniers CP MAVL + rack	bloc 04	Cellule de déchargement des emballages type V	18	u	27000	1600
Pont roulant: CMU 20T , portée : 13m, long de voie:2x30,5 m, Nucléarisé, acier peint	bloc 04	Cellule de déchargement des emballages type V	1		22000	1126
Poste de déchargement de CP - Trémie blindée motorisée avec interfaces d'accostage	bloc 04	Cellule de déchargement des emballages type V	2			593
Rack tampon de dépose des CP	bloc 04	Cellule de déchargement des emballages type V	16		25600	698

Désignation	Bloc	Fonction	Qté	Unité	Poids total (kg)	Coût M&T total (k€)
rails IPE en plafond (en m, réserve pour possible manutention bras téléopéré)	bloc 04	Cellule de déchargement des emballages type V	60	m	30000	53
rails pour chariot CMU 8T CP (m) [attention: dimensionné à 25T pour évolution future du chariot]	bloc 04	Cellule de déchargement des emballages type V	44	m	22000	39
Traversée (réserve pour possible bras téléopéré)	bloc 04	Cellule de déchargement des emballages type V	12			512
Sas de transfert petits matériels	bloc 04	cellule de déchargement des emballages V	1		0	178
Chariot de transfert	bloc 04	hall de préparation et d'accostage	7	u	350000	9954
Passerelle de visite ET (mobile)	bloc 04	hall de préparation et d'accostage	1		1500	31
rails pour chariot de transfert CMU 130T (m)	bloc 04	hall de préparation et d'accostage	200	m	100000	178
rails pour transbordeur CMU 150T (m)	bloc 04	hall de préparation et d'accostage	160	m	80000	142
Transbordeur	bloc 04	hall de préparation et d'accostage	1		50000	2370
Pièces d'interface pour accostage des emballages	bloc 04	Local de préparation des emballages type V	12		6000	171
Pont roulant: CMU 8T , portée : 13,7m, long de voie:2x37 m, Non Nucléarisé, acier peint	bloc 04	Local de préparation des emballages type V	1	u	10000	415
Poste de préparation des emballages -Trémie motorisée avec équipés type garde-corps et plateforme d'accès personnel	bloc 04	Local de préparation des emballages type V	4			1185
Retourneurs (couronnes et tappes d'emballages), châssis de dépose (couronnes, tappes, pièces d'interface d'accostage), et outillages (visseuse, contrôle des couples, élingues, anneaux de levage, ...)	bloc 04	Local de préparation des emballages type V	1			154
Pont roulant: CMU 5T , portée : 13,7m, long de voie:2x37 m, Non Nucléarisé, acier peint	bloc 04	Local d'entreposage et de maintenance des palonniers	1		9000	356
Racks pour grappins CP HA	bloc 04	Local d'entreposage et de maintenance des palonniers	3		750	20
Racks pour palonniers CP MAVL	bloc 04	Local d'entreposage et de maintenance des palonniers	18	u	9000	245
Batardeau blindé zone garage Ponts + 2 x treuils de levage CMU 50T: larg 13m x haut 2,5m x ép 0,35 m (acier) + portillon blindé coulissant motorisé pour passage outils pont: larg 2,5m x haut 2,5m x ép 0,35 m (acier)	bloc 04	Zone arrière pont cellule déchargement	1		106466	1778
Porte blindée d'accès humain Zone Garage Pont	bloc 04	Zone arrière pont cellule déchargement	1		4710	134
Cuvelage inox Cellule de déchargement	bloc 04					4358
Pont roulant (Non Nucléarisé)	bloc 05	zone tampon CS non confectionné	1	u	10000	296

Désignation	Bloc	Fonction	Qté	Unité	Poids total (kg)	Coût M&T total (k€)
Porte d'accès blindée coulissantes: larg 4,7m x haut 4m x épaisseur 1,5m (protection radio: 1,5m béton)	bloc 05	zone tampon CS non confectionné	2		155664	1614
rails pour chariot CMU 20T CS/CP (m)	bloc 05	zone tampon CS non confectionné	112	m	56000	100
rails pour transbordeur CMU 30T(m)	bloc 05	zone tampon CS non confectionné	60	m	30000	53
Pont roulant (Non Nucléarisé)	bloc 05	zone tampon CS vide	1	u	10000	296
rails pour chariot CMU 20T CS/CP (m)	bloc 05	zone tampon CS vide	300	m	150000	267
rails pour transbordeur CMU 30T (m)	bloc 05	zone tampon CS vide	60	m	30000	53
Palette support 4 pieds CMU 17T: larg 2,4 m x long 2,4 m x haut 1,3 m	bloc 05	zone tampon CtS vide	40	u	8000	1896
Equipt de contrôle pour palette et panier HA vide	bloc 06	Cellule de contrôle	1			74
Sas de transfert petits matériels	bloc 06	cellules de contrôle C5	2		0	356
Equipt de contrôle C5	bloc 06	Cellules de contrôle C5 sur process des emballages type V	2	u		119
Grappins CP HA + rack	bloc 06	Cellules de contrôle C5 sur process des emballages type V	3		4500	427
hublot: larg 1,2 m x long 1,2 m x ép 1,5 m (l'ép max du mur de radiopro est considérée)	bloc 06	Cellules de contrôle C5 sur process des emballages type V	7			2986
Palonniers CP MAVL + rack	bloc 06	Cellules de contrôle C5 sur process des emballages type V	18	u	27000	1600
Pont roulant: CMU 20T , portée : 8m, long de voie:2x32 m, Nucléarisé, acier peint	bloc 06	Cellules de contrôle C5 sur process des emballages type V	2		32000	2103
Porte d'accès blindée coulissante : larg 3,6m x haut 4m x épaisseur 1,5m (protection radio: 1,5m béton à confirmer en APS)	bloc 06	Cellules de contrôle C5 sur process des emballages type V	4		238464	2473
rails IPE en plafond (en m, réserve pour possible manutention bras téléopéré)	bloc 06	Cellules de contrôle C5 sur process des emballages type V	70	m	35000	62
Table tournante	bloc 06	Cellules de contrôle C5 sur process des emballages type V	2		14029	1662
Trappe motorisée de chargement des Cts (en CP)	bloc 06	Cellules de contrôle C5 sur process des emballages type V	2	u	78500	814
Traversée (réserve pour possible bras téléopéré)	bloc 06	Cellules de contrôle C5 sur process des emballages type V	14			597
Equipement de décontamination	bloc 06	Cellules de contrôle C5 sur process des emballages type V (zone de remise en conformité)	1			59

Désignation	Bloc	Fonction	Qté	Unité	Poids total (kg)	Coût M&T total (k€)
Table tournante	bloc 06	Cellules de contrôle C5 sur process des emballages type V (zone de remise en conformité)	1		7014	831
Chariot de transfert CMU 8T	bloc 06	secteur contrôle C5 et chargement des CP en CS	1		4000	171
Porte d'accès blindée coulissantes: larg 4,7m x haut 4m x épaisseur 1,5m (protection radio: 1,5m béton)	bloc 06	secteur contrôle C5 et chargement des CP en CS	8		622656	6456
Table élévatrice	bloc 06	secteur contrôle C5 et chargement des CP en CS	2		20000	569
Transbordeur	bloc 06	secteur contrôle C5 et chargement des CP en CS	2		42000	1792
Porte bouchon	bloc 06	Zone arrière des cellules de contrôle C5 sur process des emballages type V	2		29808	353
Batardeau blindé zone garage Ponts + 2 x treuils de levage CMU 50T: larg 8m x haut 2,5m x ép 0,35 m (acier) + portillon blindé coulissant motorisé pour passage outils pont: larg 2,5m x haut 2,5m x ép 0,35 m (acier)	bloc 06	Zone arrière pont cellule déchargement	2		144244	3555
Batardeau blindé zone garage Ponts + 2 x treuils de levage CMU 50T: larg 5m x haut 4m x ép 0,35 m (acier) + portillon blindé coulissant motorisé pour passage outils pont: larg 2,5m x haut 2,5m x ép 0,35 m (acier)	bloc 06	Zone arrière pont cellule de remise en conformité	1		72122	1778
Porte blindée d'accès humain Zone Garage Pont	bloc 06	Zone arrière ponts cellules de contrôle C5	3		14130	402
Sas de transfert de frottis	bloc 06	zone de contrôle C5	2		0	356
Pont roulant: CMU 5T , portée : 5m, long de voie:2x13 m, Non Nucléarisé, acier peint	bloc 06	Zone de contrôle C5, cellule de remis en conformité	1		5000	237
Cuvelage inox Cellule de remise en conformité	bloc 06					1046
Cuvelage inox Cellules de contrôle C5	bloc 06					6177
Chariot de transfert CS/CP	bloc 07	secteur contrôle C5 et chargement des CP en CS	4		40000	1706
Chariot de transfert CS/CP	bloc 07	zone tampon CS non confectionné	2		20000	853
Palette support 4 pieds CMU 17T: larg 2,4 m x long 2,4 m x haut 1,3 m	bloc 07	zone tampon CS non confectionné	30	u	6000	1422
Panier pour 1 Cts HA	bloc 07	zone tampon CS non confectionné	40	u	40000	3555
Pont roulant (Non Nucléarisé)	bloc 07	zone tampon CS non confectionné	1	u	10000	296

Désignation	Bloc	Fonction	Qté	Unité	Poids total (kg)	Coût M&T total (k€)
Porte d'accès blindée coulissantes: larg 5,4m x haut 5m x épaisseur 1,5m (protection radio: 1,5m béton)	bloc 07	zone tampon CS non confectionné	1		111780	1159
rails pour chariot CMU 20T CS/CP (m)	bloc 07	zone tampon CS non confectionné	280	m	140000	249
rails pour transbordeur CMU 30T (m)	bloc 07	zone tampon CS non confectionné	46	m	23000	41
Transbordeur	bloc 07	zone tampon CS non confectionné	1		21000	896
Equipt de contrôle C6	bloc 08	cellule de conditionnement HA	1			474
Equipt de contrôle US	bloc 08	cellule de conditionnement HA	2			1185
Equipt de détentionnement (pour 4 CS)	bloc 08	cellule de conditionnement HA	1			356
Equipt de nettoyage (usinage)	bloc 08	cellule de conditionnement HA	1			593
Equipt de soudure FE + casemate blindée	bloc 08	cellule de conditionnement HA	2			2133
rails IPE en plafond (en m, réserve pour possible manutention bras téléopéré)	bloc 08	cellule de conditionnement HA et MAVL	100	m	50000	89
hublot: larg 1,2 m x long 1,2 m x ép 1,5 m (l'ép max du mur de radiopro est considérée)	bloc 08	cellules de conditionnement HA et MAVL	10			4266
Sas de transfert petits matériels	bloc 08	cellules de conditionnement MAVL et HA	2		0	356
Ascenseurs personnels - 1T	bloc 08	NA	5		0	356
Monte-charges matériels - 5T	bloc 08	NA	5		0	889
Table tournante	bloc 08	secteur contrôle C5 et chargement des CP en CS	1		1590	188
Pont roulant sas sup: CMU 25T , portée : 8,4m, long de voie:2x41,6 m, Non Nucléarisé, acier peint	bloc 08	Zone à l'aplomb des cellules de conditionnement HA et MAVL	2	u	26000	830
Trappe blindée non motorisée d'accès aux cellules de conditionnement HA et MAVL: 5,5m x 5,5m x 0,4m (acier avec ép radiologique à confirmer en APS)	bloc 08	Zone à l'aplomb des cellules de conditionnement HA et MAVL	2		189970	1970
Armoires, meuleuse/tronçonneuse, étagères, presse, perceuse à colonne, poste à soudure et établi	bloc 09	Atelier chaud	1			59
Armoires, meuleuse/tronçonneuse, étagères, presse, perceuse à colonne, poste à soudure et établi	bloc 09	Atelier chaud	1			59
Pont roulant: CMU 8T , portée : 7,7m, long de voie:2x16 m, Non Nucléarisé, acier peint	bloc 09	Atelier chaud	1	u	8000	296
Pont roulant: CMU 8T , portée : 7,7m, long de voie:2x16 m, Non Nucléarisé, acier peint	bloc 09	Atelier chaud	1	u	8000	296

Désignation	Bloc	Fonction	Qté	Unité	Poids total (kg)	Coût M&T total (k€)
6 armoires + 18 étagères	bloc 09	Magasin chaud	1			26
6 armoires + 18 étagères	bloc 09	Magasin chaud	1			26
Bras télémanipulateurs	bloc 09	Magasin chaud	6		0	683
Chariot élévateur - 5T	bloc 09	Magasin chaud	1		0	83
Nacelle élévatrice de maintenance	bloc 09	Magasin chaud	3		0	71
Palans - 1T	bloc 09	Magasin chaud	5		1250	36
Transpalette électrique 3T	bloc 09	Magasin chaud	4		0	47
rails pour transbordeur CMU 30T (m)	bloc 09	secteur contrôle C5 et chargement des CP en CS	170	m	85000	151
Porte blindée d'accès humain Zone Garage Pont	bloc 09	Zone à l'aplomb des cellules de conditionnement HA et MAVL	2		9420	268
Trappe blindée non motorisée d'accès à la zone arrière pont: 8m x 3,2m x 0,2m (acier avec ép radiologique à confirmer en APS)	bloc 09	Zone à l'aplomb des zones arrière pont des cellules de conditionnement HA et MAVL	2		80384	833
Batardeau blindé zone garage Ponts + 2 x treuils de levage CMU 50T: larg 7m x haut 4m x ép 0,35 m (acier) + portillon blindé coulissant motorisé pour passage outils pont: larg 2,5m x haut 2,5m x ép 0,35 m (acier)	bloc 09	Zone arrière pont cellules déconditionnement HA	2		188204	3555
Porte blindée d'accès humain Zone Garage Pont	bloc 09	Zone arrière pont cellules déconditionnement MAVL	2		9420	268
Chariot de transfert CS/CP	bloc 09	zone tampon CS confectionné	4		40000	1706
Palette support 4 pieds CMU 17T: larg 2,4 m x long 2,4 m x haut 1,3 m	bloc 09	zone tampon CS confectionné	42	u	8400	1991
Porte d'accès blindée coulissantes: larg 5,4m x haut 5m x épaisseur 1,5m (protection radio: 1,5m béton)	bloc 09	zone tampon CS confectionné	2		223560	2318
Rack de 4 CS HA confectionnés (positionné sur palette)	bloc 09	zone tampon CS confectionné	7	u	32900	897
rails pour chariot CMU 20T CS/CP (m)	bloc 09	zone tampon CS confectionné	360	m	180000	320
rails pour transbordeur CMU 30T (m)	bloc 09	zone tampon CS confectionné	180	m	90000	160
Transbordeur	bloc 09	zone tampon CS confectionné	2		42000	1792
Unité d'approvisionnement du matériau de remplissage: structure métallique porteuse, trémie crève sachet et dépoussiéreur, système pneumatique de circulation, réseau de tuyauteries.	bloc 10	Local d'approvisionnement du matériau de remplissage	1			156

Désignation	Bloc	Fonction	Qté	Unité	Poids total (kg)	Coût M&T total (k€)
Pont roulant: CMU 8T , portée : 12,4m, long de voie:2x14,9 m, Non Nucléarisé, acier peint	bloc 10	Local de fabricaton du liant de clavage	1	u		356
Pont roulant: CMU 8T , portée : 12,4m, long de voie:2x14,9 m, Non Nucléarisé, acier peint	bloc 10	Local de fabricaton du liant de clavage	1	u	10000	356
Unité de fabrication de liant de clavage: structure métallique porteuse, trémie crève sache et dépoussiéreur, malaxeur, pompes adjuvant, pompe coulis, trémie de mélange, réseau de tuyauteries.	bloc 10	Local de fabricaton du liant de clavage	1			284
rails pour chariot CMU 20T CS/CP (m)	bloc 10	secteur contrôle C5 et chargement des CP en CS	150	m	75000	133
Palette support 4 pieds CMU 17T: larg 2,4 m x long 2,4 m x haut 1,3 m	bloc 10	zone tampon CS confectionné	28	u	5600	1327
Pont roulant (Non Nucléarisé)	bloc 10	zone tampon CS confectionné	2	u	20000	593
Porte d'accès blindée coulissantes: larg 4,7m x haut 4m x épaisseur 1,5m (protection radio: 1,5m béton)	bloc 10	zone tampon CS confectionné	1		77832	807
Porte d'accès blindée coulissantes: larg 5,4m x haut 5m x épaisseur 1,5m (protection radio: 1,5m béton)	bloc 10	zone tampon CS confectionné	2		223560	2318
rails pour chariot CMU 20T CS/CP (m)	bloc 10	zone tampon CS confectionné	221	m	110500	196
rails pour transbordeur CMU 30T (m)	bloc 10	zone tampon CS confectionné	116	m	58000	103
Sas de transfert petits matériels	bloc 11	cellule accostage HA / cellule accostage MAVL et cellule de contrôle C7	3		0	533
Pont roulant (Nucléarisé)	bloc 11	cellule de conditionnement MAVL	1		15000	1126
Table tournante	bloc 11	Cellule de contrôle C7 et cellule mise en hotte MAVL	2		14363	2127
Basculeur de CS HA avec monte et baisse	bloc 11	Cellule de mise en hotte HA	1			36
Equipt de contrôle C7 pour CS HA	bloc 11	Cellule de mise en hotte HA	1			296
Fourreau d'adaptation pour permettre l'introduction des deux types de colis de stockage HA	bloc 11	Cellule de mise en hotte HA	1			59
Grappin pour CS HA + rack	bloc 11	Cellule de mise en hotte HA	1		1500	142
Pont roulant: CMU 20T , portée : 7m, long de voie: 2x20,6 m, Nucléarisé, acier peint	bloc 11	Cellule de mise en hotte HA	1		15000	948
Rack de 4 CS HA confectionnés (positionné en ligne)	bloc 11	Cellule de mise en hotte HA	1		500	14
hublot: larg 1,2 m x long 1,2 m x ép 1,5 m (l'ép max du mur de radiopro est considérée)	bloc 11	Cellule de mise en hotte HA, cellule de mise en hotte MAVL et cellule de contrôle C7	5			2133

Désignation	Bloc	Fonction	Qté	Unité	Poids total (kg)	Coût M&T total (k€)
Porte d'accès blindée guillotine: larg 5,4m x haut 4,5m x épaisseur 1,5m (protection radio: 1,5m béton à confirmer en APS)	bloc 11	Cellule de mise en hotte HA, cellule de mise en hotte MAVL et cellule de contrôle C7	3		301806	3129
rails IPE en plafond (en m, réserve pour possible manutention bras téléopéré)	bloc 11	Cellule de mise en hotte HA, cellule de mise en hotte MAVL et cellule de contrôle C7	50	m	25000	44
rails pour chariot de transfert CMU 20T CS/CP + table de chargement CS MAVL (m)	bloc 11	Cellule de mise en hotte HA, cellule de mise en hotte MAVL et cellule de contrôle C7	50	m	25000	44
Traversée (réserve pour possible bras téléopéré)	bloc 11	Cellule de mise en hotte HA, cellule de mise en hotte MAVL et cellule de contrôle C7	10			427
Grappin pour CS MAVL + rack	bloc 11	Cellule de mise en hotte MAVL	1		1500	142
Pont roulant (Nucléarisé)	bloc 11	Cellule de mise en hotte MAVL	1		15000	948
Table de chargement CMU 20T type 1 (long 8m x larg 1,5m x haut 1,3 m) avec système monte et baisse et deux barrières anti chute	bloc 11	Cellule de mise en hotte MAVL	1		10000	237
Equipt de contrôle C7 pour CS MAVL	bloc 11	Cellule mutualisée pour contrôle C7 des CS MAVL	1			296
Pont roulant sas sup: CMU 30T , portée : 20m, long de voie:2x24 m, Non Nucléarisé, acier peint	bloc 11	Sas camion d'accès matériels neufs ou usagés conventionnels	1	u	32000	533
Trappe béton non motorisée d'accès au parc à hotte: 12,80m x 5,8m x 0,5m (système de dalles amovibles)	bloc 11	Sas camion d'accès matériels neufs ou usagés conventionnels	1		93914	974
Trappe blindée non motorisée d'accès à la zone arrière pont: 14m x 3m x 0,1m (acier avec ép radiologique à confirmer en APS)	bloc 11	Zone à l'aplomb de la zone arrière pont des cellules de mise en hotte HA et MAVL	2		65940	684
Pont roulant sas sup: CMU 25T , portée : 14,3m, long de voie:2x37 m, Non Nucléarisé, acier peint	bloc 11	Zone à l'aplomb des cellules de mise en hotte HA et MAVL	1	u	18000	415
Porte blindée d'accès humain Zone Garage Pont	bloc 11	Zone à l'aplomb des cellules de mise en hotte HA et MAVL	1		4710	134
Trappe blindée non motorisée d'accès aux cellules de mise en hotte HA et MAVL: 10m x 2,5m x 0,2m (acier avec ép radiologique à confirmer en APS)	bloc 11	Zone à l'aplomb des cellules de mise en hotte HA et MAVL	2		78500	814
Porte bouchon	bloc 11	Zone arrière	2		29808	353
Batardeau blindé zone garage Ponts + 2 x treuils de levage CMU 50T: larg 13,6m x haut 2,5m x ép 0,35 m (acier) + portillon blindé coulissant motorisé pour passage outils pont: larg 2,5m x haut 2,5m x ép 0,35 m (acier)	bloc 11	Zone arrière pont cellule de mise en hotte HA	1		110587	1778

Désignation	Bloc	Fonction	Qté	Unité	Poids total (kg)	Coût M&T total (k€)
Porte blindée d'accès humain Zone Garage Pont	bloc 11	Zone arrière pont cellule de mise en hotte HA	1		4710	134
Batardeau blindé zone garage Ponts + 2 x treuils de levage CMU 50T: larg 13,6m x haut 2,5m x ép 0,35 m (acier) + portillon blindé coulissant motorisé pour passage outils pont: larg 2,5m x haut 2,5m x ép 0,35 m (acier)	bloc 11	Zone arrière pont cellule de mise en hotte MAVL	1		110587	1778
Porte blindée d'accès humain Zone Garage Pont	bloc 11	Zone arrière pont cellule de mise en hotte MAVL	1		4710	134
Sas de transfert de frottis	bloc 11	zone de contrôle C7	1		0	178
Pont roulant (Nucléarisé)	bloc 12	cellule de conditionnement HA	1		15000	1126
Porte d'accès blindée guillotine: larg 5,4m x haut 4,5m x épaisseur 1,5m (protection radio: 1,5m béton à confirmer en APS)	bloc 12	Cellule de mise en hotte MAVL	2		201204	2086
Sas de transfert petits matériels	bloc 12	cellule de mise en hotte MAVL	1		0	178
hublot: larg 1,2 m x long 1,2 m x ép 1,5 m (l'ép max du mur de radiopro est considérée)	bloc 12	Cellule de mise en hotte MAVL (équipée de 2 accostages)	4		0	1706
Pont roulant: CMU 20T , portée : 13,6m, long de voie: 2x23,5 m, Nucléarisé, acier peint	bloc 12	Cellule de mise en hotte MAVL (équipée de 2 accostages)	1		22000	830
rails IPE en plafond (en m, réserve pour possible manutention bras téléopéré)	bloc 12	Cellule de mise en hotte MAVL (équipée de 2 accostages)	40	m	20000	36
rails pour chariot de transfert CMU 20T CS/CP + table de chargement CS MAVL (m)	bloc 12	Cellule de mise en hotte MAVL (équipée de 2 accostages)	50	m	25000	44
Table de chargement CMU 20T type 2 (long 8m x larg 1,5m x haut 1,3 m) avec système monte et baisse et deux barrières anti chute	bloc 12	Cellule de mise en hotte MAVL (équipée de 2 accostages)	1		10000	237
Table de chargement CMU 20T type 3 (long 8m x larg 1,5m x haut 1,3 m) avec système monte et baisse et deux barrières anti chute	bloc 12	Cellule de mise en hotte MAVL (équipée de 2 accostages)	1		10000	237
Table tournante	bloc 12	Cellule de mise en hotte MAVL (équipée de 2 accostages)	2		14363	2127
Traversée (réserve pour possible bras téléopéré)	bloc 12	Cellule de mise en hotte MAVL (équipée de 2 accostages)	8		0	341
Pont roulant sas sup: CMU 25T , portée : 14,3m, long de voie:2x23,4 m, Non Nucléarisé, acier peint	bloc 12	Zone à l'aplomb de la cellule de mise en hotte MAVL	1	u	18000	356
Porte blindée d'accès humain Zone Garage Pont	bloc 12	Zone à l'aplomb de la cellule de mise en hotte MAVL	1		4710	134

Désignation	Bloc	Fonction	Qté	Unité	Poids total (kg)	Coût M&T total (k€)
Trappe blindée non motorisée d'accès à la cellule de mise en hotte MAVL: 10m x 2,5m x 0,2m (acier avec ép radiologique à confirmer en APS)	bloc 12	Zone à l'aplomb de la cellule de mise en hotte MAVL	1		39250	407
Trappe blindée non motorisée d'accès à la zone arrière pont: 14m x 3m x 0,1m (acier avec ép radiologique à confirmer en APS)	bloc 12	Zone à l'aplomb de la zone arrière pont de la cellule de mise en hotte MAVL	1		32970	342
Batardeau blindé zone garage Ponts + 2 x treuils de levage CMU 50T: larg 13,6m x haut 2,5m x ép 0,35 m (acier) + portillon blindé coulissant motorisé pour passage outils pont: larg 2,5m x haut 2,5m x ép 0,35 m (acier)	bloc 12	Zone arrière pont cellule de mise en hotte MAVL	1		110587	1778
Porte blindée d'accès humain Zone Garage Pont	bloc 12	Zone arrière pont cellule de mise en hotte MAVL	1		4710	134
Porte bouchon	bloc 12	Zone avant	1		14904	177
Traversée (réserve pour possible bras téléopéré)	bloc 14	cellules de conditionnement HA et MAVL	10			427
Cuvelage inox Cellule CN-D	Bloc 14					1505
Porte bouchon	bloc 15	zone arrière cellules de conditionnement MAVL et HA	5		74520	883
Accélérateur Haute Energie	bloc 15		1			1778
Accélérateur Haute Energie	bloc 15		1			1778
Accostages emballages prélèvements type PADIRAC	bloc 15		1			190
Batardeau blindé Zone garage Ponts	bloc 15		1		0	1778
Batardeau blindé Zone garage Ponts	bloc 15		2		0	3555
Batardeau blindé Zone garage Ponts	bloc 15		2		0	3555
Batardeau blindé Zone garage Ponts	bloc 15		1		0	1778
blocs utilité	bloc 15		2			2844
Boîte à Gants	bloc 15		2			190
Cellule de mesure neutronique	bloc 15		1			1778
Cellule d'imagerie X	bloc 15		1			1778
Cellule d'Interrogation Photonique Active	bloc 15		1			1778
Chariot distribution "CD prélèvement"	bloc 15		1			356
Chariot distribution "CND"	bloc 15		1			356
Chariot distribution "Contrôles non nucléaire"	bloc 15		1			356
Chariot distribution "générale"	bloc 15		1			356

Désignation	Bloc	Fonction	Qté	Unité	Poids total (kg)	Coût M&T total (k€)
Chariot distribution "Imagerie X"	bloc 15		1			356
Chariot distribution "IPA"	bloc 15		1			356
Chariot distribution "Mesure Neutronique"	bloc 15		1			356
Chariot distribution "tampon"	bloc 15		1			356
Chariot distribution en cellule	bloc 15		1			356
Chariot distribution en cellule	bloc 15		1			356
Chariot distribution en cellule	bloc 15		1			356
Ensemble de panoplies "gaz" avec différents postes de mesure	bloc 15		1			119
Groupes utilités (panoplies de distribution, etc.)	bloc 15		5			148
Groupes utilités (panoplies de distribution, etc.)	bloc 15		5			148
Palonniers CP	bloc 15		2			178
Palonniers CP	bloc 15		2			178
Palonniers CP	bloc 15		2			178
Palonniers CP	bloc 15		1			89
Palonniers CS	bloc 15		2			178
Palonniers CS	bloc 15		2			178
Palonniers CS	bloc 15		2			178
Palonniers CS	bloc 15		2			178
Palonniers CS	bloc 15		1			89
Palonniers équipements	bloc 15		2			178
Pont de maintenance CMU 10 à 20 tonnes	bloc 15		1			237
Pont de maintenance CMU 10 à 20 tonnes	bloc 15		1			237
Pont de maintenance CMU 10 à 20 tonnes	bloc 15		1			237
Pont de maintenance CMU 15 à 30 tonnes	bloc 15		1			1185
Pont de maintenance CMU 15 à 30 tonnes	bloc 15		1			533
Pont de maintenance CMU 5 à 10 tonnes	bloc 15		1			213
Pont de maintenance CMU 5 à 10 tonnes	bloc 15		1			213
Pont de maintenance CMU 5 à 10 tonnes	bloc 15		1			213
Pont de maintenance CMU 5 tonnes	bloc 15		1			593
Pont de maintenance CMU 5 tonnes	bloc 15		1			593

Désignation	Bloc	Fonction	Qté	Unité	Poids total (kg)	Coût M&T total (k€)
Pont de maintenance CMU 5 tonnes	bloc 15		1			593
Pont de maintenance CMU 5 tonnes mini (changement des verres)	bloc 15		1			71
Pont de maintenance CMU 5 tonnes mini (changement des verres)	bloc 15		1			71
Pont de maintenance CMU 5 tonnes mini (changement des verres)	bloc 15		1			71
Pont Télémanipulateur lourd CMU 100/500 kg	bloc 15		1			1185
Ponts de déchargement CMU 15 à 30 tonnes (HA et MAVL)	bloc 15		2			2844
Ponts de déchargement CMU 15 à 30 tonnes (HA et MAVL)	bloc 15		2			2844
Ponts de déchargement CMU 15 à 30 tonnes (HA et MAVL)	bloc 15		1			1422
Porte blindée d'accès en cellule	bloc 15		1			142
Porte blindée d'accès en cellule	bloc 15		1			142
Porte blindée d'accès en cellule	bloc 15		1			142
Porte blindée d'accès en cellule	bloc 15		1			142
Porte blindée d'accès en cellule	bloc 15		1			142
Porte blindée d'accès en cellule	bloc 15		1			142
Porte blindée d'accès en Sas personnel et matériel	bloc 15		1			142
Porte blindée d'accès en Sas personnel et matériel	bloc 15		1			142
Porte blindée d'accès en Sas personnel et matériel	bloc 15		1			142
Porte blindée d'accès en Sas personnel et matériel	bloc 15		1			142
Porte blindée d'accès en Sas personnel et matériel	bloc 15		1			142
Porte blindée d'accès en Sas personnel et matériel	bloc 15		1			142
Porte blindée d'accès humain Zone Garage Pont	bloc 15		1			142
Porte blindée d'accès humain Zone Garage Pont	bloc 15		2			284
Porte blindée d'accès humain Zone Garage Pont	bloc 15		2			284
Porte blindée d'accès humain Zone Garage Pont	bloc 15		1			142
Porte blindée entrée des colis	bloc 15		1		122958	1275
Porte blindée transfert colis vers CD prélèvement	bloc 15		1		122958	1275
Porte blindée transfert colis vers CND	bloc 15		1		122958	1275
Porte blindée transfert colis vers Contrôles non nucléaire	bloc 15		1		122958	1275
Porte blindée transfert colis vers Imagerie X	bloc 15		1		122958	1275

Désignation	Bloc	Fonction	Qté	Unité	Poids total (kg)	Coût M&T total (k€)
Porte blindée transfert colis vers IPA	bloc 15		1		122958	1275
Porte blindée transfert colis vers Mesure Neutronique	bloc 15		1		122958	1275
Porte blindée transfert colis vers tampon	bloc 15		1		122958	1275
Poste de contrôle SPR à réception HA (table tournante, système de mesure DDD et système de réalisation de frottis)	bloc 15		1			166
Poste de contrôle SPR à réception MAVL (table tournante, système de mesure DDD et système de réalisation de frottis)	bloc 15		1			166
Poste de contrôles de corrosion interne	bloc 15		1			296
Poste de contrôles dimensionnels HA (caméra de prises de vues et balance de pesée)	bloc 15		1			107
Poste de contrôles dimensionnels MAVL (table tournante, caméra de prises de vues et balance de pesée)	bloc 15		1			107
Poste de dégazage tritium	bloc 15		1			533
Poste de mesure de puissance thermique	bloc 15		2			356
Poste de prélèvement	bloc 15		1			948
Poste de prélèvement monté sur potence	bloc 15		1			1001
Poste de rebouchage	bloc 15		1			83
Poste de spectrométrie gamma spectromètre sur chariot élévateur autonome course 12m plateau tournant pour colis	bloc 15		1			296
Poste de travail de type 0 (châssis avec fenêtre radioprotection, 1 caméra dôme, 1 interphone, 6 réserves pour traversées avec bouchon radiologique et système de gestion vidéo)	bloc 15		2			640
Poste de travail de type 0 (châssis avec fenêtre radioprotection, 1 caméra dôme, 1 interphone, 6 réserves pour traversées avec bouchon radiologique et système de gestion vidéo)	bloc 15		1			320
Poste de travail de type 0 (châssis avec fenêtre radioprotection, 1 caméra dôme, 1 interphone, 6 réserves pour traversées avec bouchon radiologique et système de gestion vidéo)	bloc 15		1			320

Désignation	Bloc	Fonction	Qté	Unité	Poids total (kg)	Coût M&T total (k€)
Poste de travail de type 0 (châssis avec fenêtre radioprotection, 1 caméra dôme, 1 interphone, 6 réserves pour traversées avec bouchon radiologique et système de gestion vidéo)	bloc 15		1			320
Poste de travail de type 0 (châssis avec fenêtre radioprotection, 1 caméra dôme, 1 interphone, 6 réserves pour traversées avec bouchon radiologique et système de gestion vidéo)	bloc 15		1			320
Poste de travail de type I	bloc 15		1			498
Poste de travail de type I	bloc 15		6			2986
Poste de travail de type I	bloc 15		2			995
Poste de travail de type II (1 ou 2 bras télémanipulateurs, 1 caméra dôme, 1 interphone, 2 écrans de visualisation et système de gestion vidéo)	bloc 15		10			2015
Potences de reprises de charges HA	bloc 15		2			356
Racks outils et équipements	bloc 15		4			47
Rails de chariot	bloc 15		1			1244
Rails de chariot	bloc 15		1			18
Rails de chariot	bloc 15		1			18
Rails de chariot	bloc 15		1			18
Rails de chariot	bloc 15		1			213
Rails de chariot	bloc 15		1			213
Rails de chariot	bloc 15		1			36
Sas de transfert de frottis	bloc 15		2			356
Sas petits matériels	bloc 15		1			178
Sas petits matériels	bloc 15		1			178
Sas petits matériels	bloc 15		1			178
Traversées de Ventilation Nucléaire	bloc 15		2			36
Traversées de Ventilation Nucléaire	bloc 15		1			18
Traversées de Ventilation Nucléaire	bloc 15		1			18
Traversées de Ventilation Nucléaire	bloc 15		1			18
Traversées mécaniques et motorisation externalisées	bloc 15		1			9

Désignation	Bloc	Fonction	Qté	Unité	Poids total (kg)	Coût M&T total (k€)
Trémie blindée motorisée accès en cellule	bloc 15		1			474
Zone garage Ponts avec poste de travail humain	bloc 15		1			178
Zone garage Ponts avec poste de travail humain	bloc 15		2			356
Zone garage Ponts avec poste de travail humain	bloc 15		2			356
Zone garage Ponts avec poste de travail humain	bloc 15		1			178
Zone tampon "colis attente traitement" avec rack anti missilité	bloc 15		15			889
Zone tampon "colis contrôlé non conforme" avec rack anti missilité	bloc 15		6			356
Equipt remplissage des vides	bloc 16	cellule de conditionnement MAVL	1			178
Porte d'accès blindée guillotine : larg 5,4m x haut 5,5m x épaisseur 1,5m (protection radio: 1,5m béton à confirmer en APS)	bloc 16	couloir d'accès contrôles de 2nd niveau	1		122958	1275
Pont roulant: CMU 15T , portée : 8m, long de voie:2x10,6 m, Non Nucléarisé, acier peint	bloc 16	zone arrière chariot/transbordeur contrôle de 2nd niveau	1	u	10000	296
Equipt de vissage (+ outil pour découpe visserie grippée)	bloc 17	cellule de conditionnement MAVL	1			27
Porte d'accès blindée coulissante : larg 5,4m x haut 5,5m x épaisseur 1,5m (protection radio: 1,5m béton à confirmer en APS)	bloc 17	couloir d'accès contrôles de 2nd niveau	1		122958	1275
Porte d'accès blindée coulissante : larg 5m x haut 4,5m x épaisseur 1,5m (protection radio: 1,5m béton à confirmer en APS)	bloc 17	couloir d'accès contrôles de 2nd niveau	2		186300	1932
rails pour transbordeur CMU 30T (m)	bloc 17	couloir d'accès contrôles de 2nd niveau	140	m	70000	124
Transbordeur	bloc 17	couloir d'accès contrôles de 2nd niveau	1		21000	896
6 armoires + 18 étagères	bloc 18	Atelier chaud	1		0	26
Armoires, meuleuse/tronçonneuse, étagères, presse, perceuse à colonne, poste à soudure et établi	bloc 18	Atelier chaud	1		0	59
Pont roulant: CMU 8T , portée : 8,8m, long de voie:2x17,6 m, Non Nucléarisé, acier peint	bloc 18	Atelier chaud	1	u	8000	296
Equipt de clavage	bloc 18	cellule de conditionnement MAVL	1			178
Pont roulant: CMU 10T , portée : 9,8m, long de voie:2x13 m, Nucléarisé, acier peint	bloc 18	cellules de chargement des CP ou autres déchets reconditionnés (côté HA)	1	u	13000	711

Désignation	Bloc	Fonction	Qté	Unité	Poids total (kg)	Coût M&T total (k€)
Pont roulant: 10T , portée : 11,3m, long de voie:2x13 m, Nucléarisé, acier peint	bloc 18	cellules de chargement des CP ou autres déchets reconditionnés (côté MAVL)	1	u	14000	726
Palonniers CP + rack	bloc 18	cellules déconditionnement HA	1	u	1500	89
Palonniers CS + rack	bloc 18	cellules déconditionnement HA	1	u	1500	89
Pont roulant: CMU 10T , portée : 9,8m, long de voie: 2x16,8 m, Non Nucléarisé, acier peint	bloc 18	cellules déconditionnement HA	1	u	10000	296
Pont Télémanipulateur lourd CMU 100/500 kg, portée : 9,8m, long de voie: 2x16,8 m, Non Nucléarisé, acier peint	bloc 18	cellules déconditionnement HA	1			1185
Porte blindée d'accès humain Zone Garage Pont	bloc 18	cellules déconditionnement HA	1	u	4710	134
Poste d'assainissement d'un CP après réouverture en zone arrière pont	bloc 18	cellules déconditionnement HA	1	u		71
Poste de destruction du CS HA (torche plasma, découpe câble acier diamant ?)	bloc 18	cellules déconditionnement HA	1	u		415
Palonniers CP + rack	bloc 18	cellules déconditionnement MAVL	1	u	1500	89
Palonniers CS + rack	bloc 18	cellules déconditionnement MAVL	1	u	1500	89
Pont roulant: CMU 10T , portée : 11,3m, long de voie:2x16,8 m, Nucléarisé, acier peint	bloc 18	cellules déconditionnement MAVL	1	u	14000	755
Pont Télémanipulateur lourd CMU 100/500 kg, portée : 11,3m, long de voie:2x16,8 m, Nucléarisé, acier peint	bloc 18	cellules déconditionnement MAVL	1			1185
Porte blindée d'accès humain Zone Garage Pont	bloc 18	cellules déconditionnement MAVL	1	u	4710	134
Poste d'assainissement d'un CP après réouverture en zone arrière pont	bloc 18	cellules déconditionnement MAVL	1	u		71
Poste de réouverture d'un CS MAVL pour mise au rebut (fraiseuse et table rotative)	bloc 18	cellules déconditionnement MAVL	1	u		178
Chariot transport emballage type RD30/31, CMU 20T	bloc 18	couloir d'accostage	1		10000	427
Pont roulant sas camion: CMU 25T , portée : 15m, long de voie:2x17,7 m, Non Nucléarisé, acier peint	bloc 18	Sas camion	1	u	18000	356
Trappe blindée non motorisée d'accès à la cellule de casse de CS HA: 5m x 5m x 0,4m (acier avec ép radiologique à confirmer en APS)	bloc 18	Zone à l'aplomb de la cellule de casse des CS HA	2		157000	1628

Désignation	Bloc	Fonction	Qté	Unité	Poids total (kg)	Coût M&T total (k€)
Trappe blindée non motorisée d'accès à la cellule de casse de CS MAVL: 5m x 5m x 0,4m (acier avec ép radiologique à confirmer en APS)	bloc 18	Zone à l'aplomb de la cellule de casse des CS MAVL	3		235500	2442
Porte blindée d'accès humain Zone Garage Pont	bloc 18	Zone à l'aplomb de la cellule de casse des CS MAVL et HA	2		9420	268
Trappe blindée non motorisée d'accès à la zone arrière pont: 11,6m x 3m x 0,2m (acier avec ép radiologique à confirmer en APS)	bloc 18	Zone à l'aplomb de la zone arrière pont de la cellule de casse des CS HA	1		54636	567
Trappe blindée non motorisée d'accès à la zone arrière pont: 11,6m x 3m x 0,2m (acier avec ép radiologique à confirmer en APS)	bloc 18	Zone à l'aplomb de la zone arrière pont de la cellule de casse des CS MAVL	1		54636	567
Pont roulant sas sup: CMU 25T , portée : 11,1m, long de voie:2x41 m, Non Nucléarisé, acier peint	bloc 18	Zone à l'aplomb des cellules de casse des CS MAVL et HA	1			415
Pont roulant sas sup: CMU 25T , portée : 12,7m, long de voie:2x26,3 m, Non Nucléarisé, acier peint	bloc 18	Zone à l'aplomb des cellules de casse des CS MAVL et HA	1	u	18000	356
Rail pour transbordeur CMU 30T ou chariot transport d'ET type RD30/31 de 20T	bloc 18	Zone accostage emballage ou CS vide	100	m	50000	89
Monte-charge: CMU 20T, pour gaine 7 m x 7 m	bloc 18	zone arrière chariot/transbordeur	1		7000	1014
Monte-charge: CMU 25T, pour gaine 7 m x 8 m	bloc 18	zone arrière chariot/transbordeur	1		10000	1185
Pont roulant: CMU 15T , portée : 8m, long de voie: 2x9,5 m, Non Nucléarisé, acier peint	bloc 18	zone arrière chariot/transbordeur	1	u	10000	296
Sas de transfert petits matériels	bloc 18	zone arrière des cellules de chargement des CP ou autres déchets reconditionnés	2			356
Sas de transfert petits matériels	bloc 18	zone arrière des cellules de déconditionnement HA et MAVL	2			356
Batardeau blindé zone garage Ponts + 2 x treuils de levage CMU 50T: larg 10,8m x haut 4m x ép 0,35 m (acier) + portillon blindé coulissant motorisé pour passage outils pont: larg 2,5m x haut 2,5m x ép 0,35 m (acier)	bloc 18	Zone arrière pont cellules déconditionnement HA	1	u	135864	1778
Batardeau blindé zone garage Ponts + 2 x treuils de levage CMU 50T: larg 10,8m x haut 4m x ép 0,35 m (acier) + portillon blindé coulissant motorisé pour passage outils pont: larg 2,5m x haut 2,5m x ép 0,35 m (acier)	bloc 18	Zone arrière pont cellules déconditionnement MAVL	1	u	135864	1778

Désignation	Bloc	Fonction	Qté	Unité	Poids total (kg)	Coût M&T total (k€)
Poste de travail : 2 bras télémanipulateurs, 1 caméra dôme, 1 interphone, 2 écrans de visualisation et système de gestion vidéo	bloc 18	zone avant des cellules de chargement des CP ou autres déchets reconditionnés	6			1621
Sas de transfert de frottis	bloc 18	zone avant des cellules de chargement des CP ou autres déchets reconditionnés	2			356
Sas de transfert de frottis	bloc 18	zone avant des cellules de déconditionnement HA et MAVL	2			356
Rail pour chariot transport d'ET type RD30/31 de 20T	bloc 18	Zone d'accès au sas camion	30	m	15000	27
Poste de spectrométrie gamma spectromètre	bloc 18	zone de contrôle des déchets d'exploitation reconditionnés	1			296
Poste de spectrométrie gamma spectromètre sur chariot élévateur autonome course 12m plateau tournant pour colis	bloc 18	zone de contrôle des déchets d'exploitation reconditionnés	1	u		296
Trappe motorisée de transfert de CP ou colis de déchets entre les cellules de cassettes et les cellules de chargement en CS ou en ET	bloc 18	zone de contrôle des déchets d'exploitation reconditionnés	2		117750	1221
Chariot de transfert CMU 11T	bloc 18	zone de gestion des CS NC	1		5500	235
Chariot de transfert CMU 1T	bloc 18	zone de gestion des CS NC	1		500	21
Chariot de transfert CMU 20T CS/CP	bloc 18	zone de gestion des CS NC	3		30000	1280
Porte d'accès blindée coulissante : larg 4,2m x haut 3,5m x épaisseur 1,5m (protection radio: 1,5m béton à confirmer en APS)	bloc 18	zone de gestion des CS NC	2		121716	1262
Porte d'accès blindée coulissante : larg 5,4m x haut 4,5m x épaisseur 1,5m (protection radio: 1,5m béton à confirmer en APS)	bloc 18	zone de gestion des CS NC	6		603612	6259
Porte d'accès blindée guillotine : larg 5,4m x haut 4,5m x épaisseur 1,5m (protection radio: 1,5m béton à confirmer en APS)	bloc 18	zone de gestion des CS NC	1		100602	1043
rails IPE en plafond (en m, réserve pour possible manutention bras téléopéré)	bloc 18	zone de gestion des CS NC	77	m		68
rails IPE en plafond (en m, réserve pour possible manutention bras téléopéré)	bloc 18	zone de gestion des CS NC	48	m		43
rails pour chariot de transfert CMU 11T (m)	bloc 18	zone de gestion des CS NC	25	m		22
rails pour chariot de transfert CMU 1T (m)	bloc 18	zone de gestion des CS NC	25	m		22
rails pour chariot de transfert CMU 20T CS/CP	bloc 18	zone de gestion des CS NC	92	m	46000	82
rails pour transbordeur CMU 30T (m)	bloc 18	zone de gestion des CS NC	290	m	145000	258
Table tournante: diamètre 3,5m, CMU : 15T	bloc 18	zone de gestion des CS NC	2		9811	1163

Désignation	Bloc	Fonction	Qté	Unité	Poids total (kg)	Coût M&T total (k€)
Table tournante: diamètre 3,5m, CMU : 15T	bloc 18	zone de gestion des CS NC	1		4906	581
Transbordeur	bloc 18	zone de gestion des CS NC	2		42000	1792
Dispositif d'aspiration avec bacs de récupération + table de travail en cellule	bloc 18	zone de traitement des déchets d'exploitation	1			71
Ensemble d'outils d'assainissement + Poste de contrôles des frottis réalisés + Ensemble d'outils mécaniques volants	bloc 18	zone de traitement des déchets d'exploitation	1			1185
Accostage emballages déchets type PADIRAC	bloc 18	zone d'entreposage des micro prélèvements	1		8000	178
Armoire d'entreposage des microprélèvements	bloc 18	zone d'entreposage des micro prélèvements	1	u		59
Emballage PADIRAC RD15	bloc 18	zone d'entreposage des micro prélèvements	1			178
Poste de chargement d'emballage déchets -Trémie blindée motorisée avec interfaces d'accostage	bloc 18	zone des cellules de chargement des CP ou autres déchets reconditionnés	2			592
Porte bouchon	bloc 18	zones arrière des cellules de chargement des CP ou autres déchets reconditionnés	2		29808	353
Porte bouchon	bloc 18	zones arrière des cellules de déconditionnement MAVL et HA	3		44712	530
Poste de travail : hublot + 2 bras télémanipulateurs, 1 caméra dôme, 1 interphone, 2 écrans de visualisation et système de gestion vidéo	bloc 18	zones arrière et avant des cellules de déconditionnement HA et MAVL	11			6100
Cuvelage inox Cellule de caractérisation des déchets	Bloc 18					1061
Cuvelage inox Cellules déchets 1	Bloc 18					4373
Cuvelage inox Cellules déchets 2	Bloc 18					1659
Cuvelage inox Cellules déchets d'accostage	Bloc 18					3475
Cuvelage inox Entreposage échantillons	Bloc 18					569
Cuvelage inox Tampon CS NC	Bloc 18					2450
Equipt de contrôle C6	bloc 19	cellule de conditionnement MAVL	1			474
Table tournante	bloc 20	cellule de conditionnement MAVL	2		14029	1662
rails pour chariot 20T CS/CP (m)	bloc 21	cellule de conditionnement MAVL	80	m	40000	71

Désignation	Bloc	Fonction	Qté	Unité	Poids total (kg)	Coût M&T total (k€)
Pont roulant (Non Nucléarisé)	bloc 21	hall de reconfig châssis support ET	1	u	13000	415
Porte d'accès blindée: larg 4,7m x haut 4m x épaisseur 1,5m (protection radio: 1,5m béton)	Bloc 22	cellules de conditionnement MAVL et HA	2		155664	1614
Lorry motorisé	bloc 22	hall de chargt/déchg	5	u	250000	14220
Palonnier + rack	bloc 22	Hall de chargt/déchg	12	u	18000	3551
Pont portique (Non nucléarisé)	bloc 22	hall de chargt/déchg	1	u		3555
rails pour lorry motorisé (m)	bloc 22	hall de chargt/déchg	1080	m	540000	960
Table tournante	bloc 22	hall de chargt/déchg	4	u	200000	4740
Table tournante	bloc 22	hall de chargt/déchg	1	u	50000	1185
Locomotive site	bloc 22	hall de maintenance locomotive et wagon	1	u	400000	17775
Pont portique (Non nucléarisé)	bloc 22	hall de maintenance locomotive et wagon	1	u		711

Tableau 15 - Liste des équipements

CHIFFRAGE CIGÉO EN PHASE ESQUISSE

Estimation du coût de base

Installations conventionnelles de surface (SS3)

Identification

CG.TE.F.NTE.AMOA.EEE.3000.14.0062/B

Octobre 2014

Pages : **22**

SOMMAIRE

1.	Objet du document	5
2.	Conception et dimensionnement des installations	5
2.1	<i>Principes de conception</i>	5
2.1.1	Principe d'organisation spatiale	5
2.1.2	Analyse programmatique	5
2.1.3	Schéma directeur	5
2.2	<i>Dimensionnement des installations</i>	6
2.2.1	Ouvrages	6
2.2.2	Verses	9
2.3	<i>Evolution de la conception entre J_{esq} 05 et J_{aps} 03b</i>	9
2.3.1	Mutualisation des installations conventionnelles avec les installations du Laboratoire souterrain	10
2.3.2	Optimisation des bâtiments conventionnels entre la zone puits et la zone descenderies	10
2.3.3	Optimisation des infrastructures d'accueil de l'organisation liée à la gestion des verses	12
3.	Méthodologie de chiffrage	13
3.1	<i>Investissement initial</i>	13
3.2	<i>Maîtrise d'œuvre, maîtrise d'ouvrage et AMO réglementaires</i>	13
3.3	<i>Jouvence</i>	14
3.4	<i>Démantèlement</i>	14
3.5	<i>Pièces de rechange</i>	14
4.	Estimation du coût de base	14
4.1	<i>Méthodologie</i>	14
4.1.1	Bâtiments	15
4.1.2	Verses	15
4.2	<i>Périmètre et limites de prestations</i>	15
4.3	<i>Investissement de la tranche 1</i>	16
4.4	<i>Autres tranches de construction</i>	16
4.5	<i>Jouvence</i>	17
4.6	<i>Démantèlement</i>	17
4.7	<i>Pièces de rechange</i>	17
4.8	<i>Synthèse des investissements</i>	18
4.9	<i>Analyse des écarts entre J_{esq} 05 et J_{aps} 03b</i>	18
4.9.1	Synthèse des écarts	18
4.9.2	Commentaires	18
4.10	<i>Chronique de dépenses</i>	19
ANNEXE 1	– Zone descenderies	20
ANNEXE 2	– Zone puits	21

TABLES DES ILLUSTRATIONS

Figures

Figure 1 – Conception des verses	9
Figure 2 – Schéma directeur des jouvences	14
Figure 3 - Chronogramme des dépenses pour le coût de base	19
Figure 5 – Zone « Descenderies »	20
Figure 6 – Zone « Puits » (scénario d’implantation 2/2bis)	21

Tableaux

Tableau 1 – Organisation spatiale	5
Tableau 2 – Ouvrages du secteur accueil	6
Tableau 3 – Ouvrages du secteur exploitation	7
Tableau 4 – Ouvrages du secteur sécurité	8
Tableau 5 – Ouvrages du secteur administratif	8
Tableau 6 – Ouvrages du secteur travaux souterrains	9
Tableau 7 – Mutualisation des installations conventionnelles avec celles du laboratoire souterrain	10
Tableau 8 – Groupement des activités sur le secteur descenderie	11
Tableau 9 – Optimisation ou suppression d’ouvrages	11
Tableau 10 – Groupement de plusieurs ouvrages	12
Tableau 11 – Taux de MOe, MOA et AMO réglementaires	13
Tableau 12 – Ratios appliqués par nature de poste pour les pièces de rechange	14
Tableau 13 - Décomposition des coûts d’investissement de la tranche 1	16
Tableau 14 - Décomposition des coûts d’investissement des autres tranches de construction	16
Tableau 15 - Décomposition des coûts de jouvence	17
Tableau 16 - Décomposition des coûts de démantèlement	17
Tableau 17 - Décomposition des coûts des pièces de rechange	17
Tableau 18 - Synthèse des coûts d’investissement	18

1. Objet du document

Ce document a pour objet de présenter le chiffrage du coût de base d'investissement des installations conventionnelles de surface constituant le sous-système 3 (SS3) et notamment :

- Le périmètre fonctionnel du sous-système (SS3) ;
- De rappeler les principes de conception et de dimensionnement ;
- De préciser les limites de prestations ;
- De décrire la méthodologie et les hypothèses de chiffrage.

Cette note s'inscrit dans le cadre du processus d'optimisation de l'esquisse aboutissant au choix d'une solution d'ensemble servant de référence pour la constitution du dossier d'APS (jalon Japs03b).

2. Conception et dimensionnement des installations

2.1 Principes de conception

2.1.1 Principe d'organisation spatiale

Les activités conventionnelles de surface (SS3), répondant au programme fonctionnel, sont regroupées au sein de 6 secteurs géographiques homogènes pour l'ensemble du site Cigéo, récapitulés dans le tableau ci-après.

Secteurs	Activités
Secteur Accueil	activités liées aux fonctions d'accueil des travailleurs, des visiteurs et du public
Secteur exploitation (conventionnelle)	activités de maintenance, de soutien, de stockage de matériels ainsi que les activités liées au personnel exploitant (vestiaire, formations, suivi médical, restauration...)
Secteur sécurité	activités liées à la sécurité des personnes et des biens (gestion incendie notamment) ainsi qu'au contrôle d'accès
Secteur administratif	activités liées à la gestion administrative et informative du site (gestion administrative...)
Secteur travaux souterrains	activités liées à la réalisation des travaux souterrains
Secteur verses	activités liées au stockage de l'argilite (réutilisée ou non)

Tableau 1 - Organisation spatiale

La logique de déploiement correspondante a ensuite été établie en tenant compte des différentes périodes d'activité de Cigéo et en pré-dimensionnant les emprises au sol des entités opérationnelles définies.

2.1.2 Analyse programmatique

Sur la base d'une pré-répartition d'ouvrages par secteur géographique, l'analyse programmatique a permis d'identifier les différentes typologies d'ouvrages à implanter :

- Tertiaire ;
- Activités industrielles : principes volumétriques simples de conception structurelle éprouvée ;
- Activités annexes : usages spécifiques tels que moyens de secours, restauration, mémoire...
- Equipements techniques.

En lien avec l'avancement des études sur l'architecture souterraine et l'exploitation nucléaire, les ouvrages identifiés par secteur ont fait l'objet d'un premier remontage : description préliminaire des ouvrages, hypothèses de dimensionnement des surfaces de plancher et des emprises au sol, premières propositions de regroupement d'ouvrages présents sur un même site et un même secteur.

2.1.3 Schéma directeur

Sur la base des éléments de conception définis précédemment et du plan de masse programmatique, un schéma directeur d'aménagement « AUPE » (architecture, urbanisme, paysager, et environnement) a été proposé.

2.2 Dimensionnement des installations

Les ouvrages relatifs aux installations conventionnelles de surface identifiés en fin d'Esquisse ont été répartis pour les phases d'APS et d'APD dans les périmètres respectifs des sous-systèmes 3, 4 et 5 ; le sous-système 4 intégrant les ouvrages de surface en lien fort avec les travaux souterrains, le Sous-système 5 les ouvrages liés aux utilités et à la protection physique (hors poste de garde) et le SS3 le restant des ouvrages conventionnels.

Le périmètre technique de SS3 couvre 3 catégories d'ouvrages :

- Les bâtiments conventionnels (11 en zone Puits – 31 en zone Descenderies)
- Les aires de stationnement et plateformes ;
- Les verses.

Ces ouvrages se répartissent sur les 2 zones du centre de stockage :

- Zone descenderies : de l'ordre de 200 hectares ;
- Zone puits : de l'ordre de 240 hectares, dont 170 hectares pour les verses et ouvrages associés.

2.2.1 Ouvrages

Les hypothèses de dimensionnement des surfaces sont présentées dans l'analyse programmatique (jalon J_{esq} 05). Les tableaux ci-après détaillent, par secteur et par zone, l'ensemble des ouvrages identifiés en début d'APS dans le périmètre SS3.

Le paragraphe 2.3 présente les optimisations, les mutualisations et les regroupements opérés.

2.2.1.1 Secteur accueil

N° Ouvrage	Ouvrages	Surfaces de plancher	Type d'ouvrage	Observations
Zone descenderies				
025	Bâtiment d'accueil du grand public (BAP) et Espace d'information	1050 m ²	Tertiaire béton plein pied	
011	Auditorium	300 m ²	Tertiaire béton plein pied	
005	Bâtiment mémoire	2000 m ² (3500 m ² à terminaison)	Tertiaire béton plein pied	
085	Parking public	2000 m ²	Voirie	

Tableau 2 - Ouvrages du secteur accueil

2.2.1.2 Secteur exploitation

N° Ouvrage	Ouvrages	Surfaces de plancher	Type d'ouvrage	Observations
Zone descenderies				
007	Ateliers et magasin froid/Entreposage pièces de rechange/Maintenance équipements (SS2)	700 m ²	Industriel métallique isolé	
008	Ateliers de maintenance et magasins associés aux domaines des services conventionnels de surface	1 650 m ²	Industriel métallique isolé	
033	Bâtiment observation de l'environnement	200 m ²	Tertiaire béton plein pied	
046	Centre de formation - exploitant - cellules blindées	1000 m ²	Tertiaire béton plein pied	
048	Centre médical - Exploitant (principal)	200 m ²	Tertiaire béton plein pied	
124	Restaurant - Exploitant	1 000 m ²	Tertiaire béton plein pied	

N° Ouvrage	Ouvrages	Surfaces de plancher	Type d'ouvrage	Observations
129	Station météo	100 m ²	Tertiaire béton plein pied	
160	Plateforme développement/essais	625 m ²	Tertiaire béton plein pied	
080	Bâtiment de transit - Entreposage et contrôle déchets exploitation	400 m ²	Industriel métallique isolé	
081	Bâtiment de transit - Equipements entrants/sortants	1 600 m ²	Industriel métallique isolé	
159	Blanchisserie	300 m ²	Industriel métallique isolé	Budget de fonctionnement
001	Accueil des convois routiers	2000 m ²	Voirie	
086	Parking visiteurs	1050 m ²	Voirie	
082	Parking opérateurs	3600 m ²	Voirie	
Zone puits				
006	Ateliers de maintenance et magasin associés à l'exploitation nucléaire (LSF + Installations souterraines)	400 m ²	Industriel métallique isolé	
009	Ateliers de maintenance et magasins associés aux domaines des services conventionnels de surface	1225 m ²	Industriel métallique isolé	
034	Bâtiment observation de l'environnement	200 m ²	Tertiaire béton plein pied	
049	Centre médical exploitant	200 m ²	Tertiaire béton plein pied	
125	Restaurant - exploitant	1000 m ²	Tertiaire béton plein pied	
130	Station météo	100 m ²	Tertiaire béton plein pied	
079	Moyens de locomotion du personnel	250 m ²	Voirie	
083	Parking opérateurs exploitation	2600 m ²	Voirie	
087	Parking visiteurs	200 m ²	Voirie	

Tableau 3 - Ouvrages du secteur exploitation

2.2.1.3 Secteur sécurité

N° Ouvrage	Ouvrages	Surfaces de plancher	Type d'ouvrage	Observations
Zone descenderies				
043	Caserne pompier	300 m ²	Locaux techniques	
051	Chenil	100 m ²	Chenil	
076	Local pomperie eau incendie	200 m ²	Locaux techniques	
088	Plateforme d'atterrissage d'hélicoptères	1 600 m ²	Aire bétonnée clôturée	
094	Poste de garde principal zone descenderie	200 m ²	Tertiaire béton plein pied	
096	Poste de garde ZAC accès convois routiers	495 m ²	Bungalow renforcé	
099	Poste de garde ZAC accès véhicules	80 m ²	Tertiaire béton plein pied	
100	Poste de garde ZAC renforcée	80 m ²	Bungalow renforcé	
163	Bâtiment d'accueil et d'identification	150 m ²	Tertiaire béton plein pied	

N° Ouvrage	Ouvrages	Surfaces de plancher	Type d'ouvrage	Observations
176	Poste de garde ZAC renforcée accès convois ferroviaires nucléaires	100 m ²	Bungalow renforcé	
177	Poste de garde ZAC renforcée accès convois ferroviaires nucléaires + SPRSE	100 m ²	Tertiaire béton plein pied	
121	Réservoir d'eau incendie	250 m ²	Réservoir	Estimé dans SS5
Zone puits				
036	Fonction sécurité zone puits	250 m ²	Tertiaire béton plein pied	
044	Caserne pompier	300 m ²	Locaux techniques	
052	Chenil	50 m ²	Chenil	
077	Local pomperie eau incendie	200 m ²	Locaux techniques	
089	Plateforme atterrissage hélicoptère	1 600 m ²	Aire bétonnée clôturée	
095	Poste de garde ZAC	810 m ²	Tertiaire béton plein pied	
097	Poste de garde ZAC (liaison ferroviaire)	400 m ²	Bungalow renforcé	
098	Poste de garde travaux	100 m ²	Tertiaire béton plein pied	
123	Réservoir d'eau incendie	250 m ²	Réservoir	Estimé dans SS5

Tableau 4 - Ouvrages du secteur sécurité

2.2.1.4 Secteur administratif

N° Ouvrage	Ouvrages	Surfaces de plancher	Type d'ouvrage	Observations
Zone descenderies				
039	Bureaux - Administration y compris	1050 m ²	Tertiaire béton R+2	
038	Bureau d'études exploitant	1800 m ²	Tertiaire béton R+1	
037	Bureau support exploitant	500 m ²	Tertiaire béton plein pied	
024	Bâtiment archive tampon	500 m ²	Tertiaire béton plein pied	
078	Parking personnel	250 m ²	Voirie (chiffrage SS5)	
Zone puits				
040	Bureaux - Administration	350 m ²	Tertiaire béton plein pied	
178	Bureau support exploitant	600 m ²	Tertiaire béton R+1	
075	Bâtiment suivi scientifique	1050 m ²	Tertiaire béton R+1	
042	Carothèque	400 m ²	Industriel métallique isolé	

Tableau 5 - Ouvrages du secteur administratif

2.2.1.5 Secteur travaux souterrains

N° Ouvrage	Ouvrages	Surfaces de plancher	Type d'ouvrage	Observations
Zone puits				
004	Aire de lavage véhicule	250 m ²	Aire bétonnée	
041	Bureaux MOA/entreprises/MOE	1000 m ²	Tertiaire béton R+1	

N° Ouvrage	Ouvrages	Surfaces de plancher	Type d'ouvrage	Observations
047	Centre de formation - Travaux et constructions	600 m ²	Tertiaire béton plein pied	Estimé en installations de chantier
050	Centre médical - Travaux et constructions	200 m ²	Tertiaire béton plein pied	
074	Laboratoire entreprises	250 m ²	Tertiaire béton plein pied	
141	Vestiaire travaux	375 m ²	Tertiaire béton plein pied	
003	Aire carburant	250 m ²	Station-service	
002	Accueil des convois routiers	2000 m ²	Voirie	
084	Parking poids lourds	1500 m ²	Aire bétonnée clôturée	
171	Parking opérateurs travaux	1480 m ²	Voirie	

Tableau 6 - Ouvrages du secteur travaux souterrains

2.2.2 Verses

Les déblais issus du creusement des ouvrages souterrains sont stockés dans des verses dites respectivement vives pour les matériaux stockés provisoirement avant réutilisation pour la fermeture des galeries et mortes pour les matériaux non réutilisés. Les spécifications de stockage des verses vives en vue de leur réutilisation seront établies pour la fin de l'APS. En attendant, l'hypothèse d'une conception identique pour les verses vives et mortes en termes d'étanchéité est retenue avec pour objectif de limiter l'impact sur l'environnement.

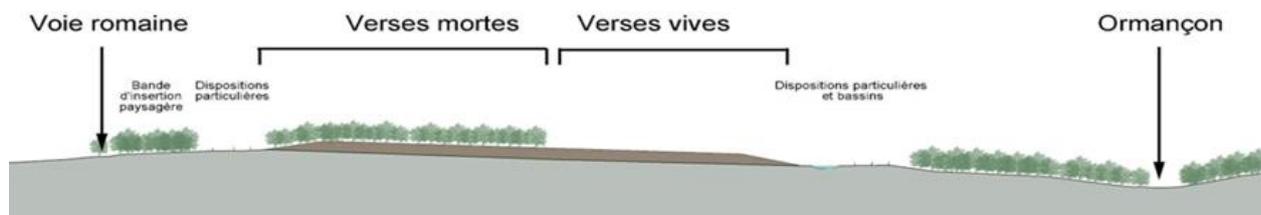


Figure 1 - Conception des verses

Les terrassements des plateformes des verses sont inclus dans les terrassements généraux (SS3), par contre le transport en surface des déblais est comptabilisé dans les coûts des travaux souterrains (SS4).

2.3 Evolution de la conception entre J_{esq} 05 et J_{aps} 03b

Le début de la phase d'APS relatif aux études d'opportunité réalisées par les MOe-SS a permis au MOe-S le remontage d'une solution de référence (J_{aps} 03b).

Cette nouvelle conception, validée en termes de choix techniques par la Maîtrise d'Ouvrage (MOA) et la Maîtrise d'œuvre Système (MOe-S), constitue la solution d'ensemble système de référence à développer pour la suite de l'APS.

Par rapport à la conception J_{esq} 05, les optimisations suivantes ont été intégrées dans le chiffrage de base 2014 :

- Mutualisation avec certaines installations du Centre Meuse/Haute-Marne ;
- Optimisation des bâtiments conventionnels entre la zone puits et la zone descenderies ;
- Réduction des excédents de déblais/remblais entre la zone descenderie et la zone puits.

2.3.1 Mutualisation des installations conventionnelles avec les installations du Laboratoire souterrain

Cette optimisation se traduit par des reports ou des annulations d'investissements (cf. tableau ci-dessous). Cette optimisation (hormis pour l'Espace Technologique - ETE) suppose que les locaux existants seront réutilisés dans l'état et que les coûts de fonctionnements associés soient pris en charge au travers du programme d'investissement actuel du CMHM.

N° Ouvrage	Ouvrages	Surfaces de plancher	Optimisation
011	Auditorium	300 m ²	Réutilisation du bâtiment d'accueil du public du LS jusqu'en 2030, report de l'investissement post T1, non retenu car les ouvrages existants ne sont pas adaptés aux besoins
025	Bâtiment d'accueil du grand public : Espace d'information	1050 m ²	
033	Bâtiment Observation de l'environnement	200 m ²	Fonctionnalité prise en charge par l'écothèque. Réduction à un seul bâtiment pour les 2 zones.
034	Bâtiment Observation de l'environnement	200 m ²	
046	Centre de formation exploitant cellules blindées	1000 m ²	Réutilisation de l'E.T.E jusqu'à sa fin de vie (estimée à l'horizon 2060), économie d'une jouvence+ report de l'investissement post T1
160	Plateforme développement essais	400 m ²	Réutilisation de l'E.T.E jusqu'à sa fin de vie (estimée à l'horizon 2060), économie d'une jouvence+ report de l'investissement post T1
039	Bureau - Administration	1050 m ²	Réutilisation des bureaux du LS, report de l'investissement post 2030
040	Bureau - Administration	350 m ²	
075	Bâtiment suivi scientifique	1050 m ²	Utilisation des locaux du LS, périmètre R&D, report de l'investissement post 2030
042	Carothèque	400 m ²	Réutilisation du bâtiment du LS, report de l'investissement post 2030

Tableau 7 - Mutualisation des installations conventionnelles avec celles du laboratoire souterrain

2.3.2 Optimisation des bâtiments conventionnels entre la zone puits et la zone descenderies

Le sujet d'études traite de plusieurs formes d'optimisation en cours dans le cadre des études de programmation du Sous-Système 3, à savoir :

- Celles résultantes du groupement d'une partie des activités sur le secteur Descenderie permettant de limiter les constructions sur le site Puits (plus contraint du point de vue des surfaces disponibles). Ce groupement permet aussi de regrouper majoritairement les fonctions d'Exploitation sur le secteur Descenderie et de donner une dominante "Travaux" à celui des Puits ;
- Celles résultantes de l'optimisation ou de la suppression d'un ouvrage (sans corrélation avec la répartition entre les deux sites) ;
- Celles résultantes des groupements de plusieurs ouvrages.

Chacune de ces formes d'optimisation est étudiée présentée sous la forme d'un tableau. Ces tableaux identifient pour chaque sous-sujet et site (Descenderie et Puits) les ouvrages concernés et impactés par le sujet d'études.

2.3.2.1 Groupement d'activités sur le secteur descenderies.

Dans l'état actuel de la réflexion et d'une manière globale, cette piste correspond à un gain global de surfaces de :

- 1600 m² d'infrastructure (suppression plateforme atterrissage hélicoptères 089) ;
- 750 m² construits répartis de la manière suivante :

Ouvrage	N° d'ouvrage	Zone Descenderie	N° d'ouvrage	Zone Puits	Total
Bureau d'accueil	163		164	-50 m ²	-50 m ²
Restaurant exploitant	124	+ 200 m ²	125	-700 m ²	-500 m ²
Centre médical	048	+ 80 m ²	049	-200 m ²	-120 m ²
Bureau administration	039	+155 m ²	040	-300 m ²	-145 m ²
Station météo	129		130	-100 m ²	-100 m ²
Chenil	051		052	-40 m ²	-40 m ²
Bureau support exploitation	038	+540 m ²	178	-600 m ²	- 60 m ²
Bât. Suivi scientifique			075	+ 315 m ²	+ 315 m ²
Bilan		+ 975 m²		- 1725 m²	- 750 m²

Tableau 8 - Groupement des activités sur le secteur descenderie

2.3.2.2 Optimisation ou suppression d'ouvrages

Dans le cadre de la programmation SS3, le fonctionnement de certaines activités a été redéfini, impliquant une suppression ou une optimisation des ouvrages :

- la blanchisserie (externalisée) impliquant la réalisation d'une simple lingerie (local relais) sur le site de la Descenderie ;
- les archives tampon (fonction intégrée directement dans chaque bâtiment).

Ces évolutions permettent donc des gains de surfaces sans incidence négative sur le fonctionnement et les activités prévues de CIGEO.

Dans l'état actuel de la réflexion, cette piste correspond à un gain global de surfaces de 650 m² construits.

N° d'ouvrage	Ouvrage	Zone Descenderie
159	Blanchisserie	-150 m ²
024	Bâtiment archives	-500 m ²
	Bilan	- 650 m²

Tableau 9 - Optimisation ou suppression d'ouvrages

2.3.2.3 Groupement de plusieurs ouvrages

Il s'agit de :

- Pour les deux sites : limiter le nombre de postes de garde et grouper le maximum de fonctions associées ;
- Pour le site Descenderies : regrouper dans un seul ouvrage tertiaire différentes activités d'administration et d'exploitation ;
- les archives tampon (fonction intégrée directement dans chaque bâtiment).

Ces groupements permettent de :

- Diminuer les surfaces nécessaires en optimisant notamment les moyens communs et les espaces supports (réunions, détente, reprographie, halls d'accès) ;
- Faciliter la gestion des accès en limitant le nombre de points devant être contrôlés ;

- Permettre la réalisation d'ensembles immobiliers spatialement cohérents et plus compacts, susceptibles de limiter les contraintes et coûts d'exploitation et favoriser l'évolutivité des espaces (groupés).

Dans l'état actuel de la réflexion, cette piste correspond à un gain global de surfaces de 1195 m² construits, réparti en :

Ouvrage	N° d'ouvrage	Zone Descenderie	N° d'ouvrage	Zone puits	Total
Regroupement bureaux : - administration, - d'études exploitant - support exploitant	039 037 038	- 405 m ²			- 405 m ²
Regroupement postes de garde	094/163	- 105 m ²	016/044/ 095/164	- 450 m ²	- 555 m ²
Regroupement bureaux : - MOA/Entreprises travaux/MOE - support exploitation - suivi scientifique	041 178 175			- 235 m ²	- 235 m ²
Bilan		- 510 m²		- 685 m²	- 1195 m²

Tableau 10 - Groupement de plusieurs ouvrages

2.3.3 Optimisation des infrastructures d'accueil de l'organisation liée à la gestion des verses

La voie d'opportunité n°12 ainsi que l'initialisation du sujet d'étude n°30 amène les optimisations suivantes :

- Gain en emprise au sol :
 - ✓ Création de digues Est et Ouest permettant le maintien des verses et l'installation des clôtures et chemin de ronde ;
 - ✓ Pente des verses mortes en 3/1 (au lieu de 5/1).
- Gain en hauteur :
 - ✓ Aménagement du site de stockage des verses en terrasses ;
 - ✓ Hauteur de stockage possible de plus de 15m.
- Composition de la couche fertile :
 - ✓ 1,5 m de terre végétale et limons sur verses mortes (au lieu de 2 m).
- Autonomie déblais remblais zone Puits afin d'éviter des apports de matériaux de la zone Descenderie (en liaison avec VO12) :
 - ✓ Recherche d'autonomie sur le site du Puits en déblais/remblais de la conception de la plateforme y compris l'encapsulation en calcaire drainant des verses (études et caractérisations des matériaux à réaliser) et la constitution des digues.

3. Méthodologie de chiffrage

Le chiffrage est présenté aux conditions économiques de janvier 2012 et tous les coûts sont présentés hors taxe.

3.1 Investissement initial

Les coûts unitaires sont issus des bases de coûts de la MOe-S qui consolident l'ensemble des projets menés par les entreprises du groupement.



Usine d'assemblage de l'A380

Maîtrise d'œuvre

Technip a notamment pris en charge la maîtrise d'œuvre générale, la conception générale du site et la maîtrise d'œuvre technique pour 80% de l'usine.



Projet EOLE – Bâtiment technique et de bureaux

Maîtrise d'œuvre

Ingérop a réalisé la maîtrise d'œuvre, le space planning et l'AMO pour les énergies.

Tout au long de la phase esquisse, le chiffrage de la MOe-S a fait l'objet de plusieurs niveaux d'évaluation :

- Contrôle par la cellule d'estimation de l'Andra ;
- Audit des méthodes et des outils par la société PwC ;
- Benchmark par rapport à d'autres références dans le cadre de la revue des coûts unitaires d'investissement sur la base de $J_{esq} 4$.

3.2 Maîtrise d'œuvre, maîtrise d'ouvrage et AMO réglementaires

Les hypothèses de chiffrage sont présentées dans la note « Estimation du coût de base de maîtrise d'œuvre et de maîtrise d'ouvrage », le tableau suivant présente les taux retenus.

Tranches	Types	Ratios
T1	MOe de conception	Intégrées au PMT et présentées dans la note MOe/MOA
	MOA	
	AMO réglementaires	
	MOe de réalisation	6%
Tu	MOe de conception	2%
	MOA	3%
	AMO réglementaires	0.5%
	MOe de réalisation (y/c jouvence et démantèlement)	6%

Tableau 11 – Taux de MOe, MOA et AMO réglementaires

3.3 Jouvence

Le schéma directeur de jouvence a fait l'objet d'une optimisation afin de limiter le renouvellement des ouvrages. Cette optimisation conduit notamment à retenir des durées de vie optimistes pour les bâtiments et certains équipements par rapport aux REX et pratiques usuelles.

Ainsi, les bâtiments conventionnels construits en tranche 1 sont reconstruits à neuf après 60 ans d'exploitation. Pendant la durée de vie de 60 ans du génie civil du bâtiment, le second œuvre (façades, couverture...) est jouvencé (« ravalement ») une fois à mi vie (30 ans), tandis que les lots techniques avec une durée de vie prévisionnelle de 20 ans (contrôle d'accès, distribution informatique, éclairage...) font l'objet de 2 jouvences, ainsi qu'illustré ci-après.

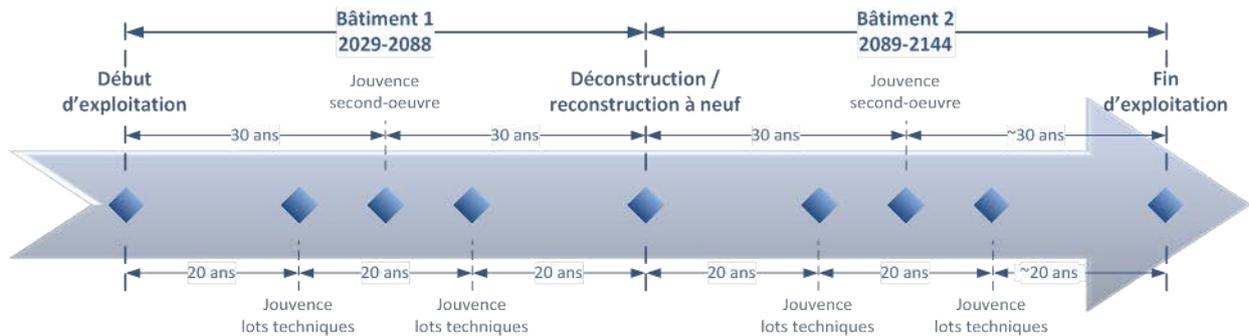


Figure 2 - Schéma directeur des jouvences

3.4 Démantèlement

Les coûts de démantèlement sont estimés à 5% des coûts de construction selon des REX fournis par les producteurs. Les coûts des verses sont exclus de l'assiette d'investissement sur laquelle s'applique ce ratio.

3.5 Pièces de rechange

A ce stade des études, le montant annuel des pièces de rechange est estimé sur la base de ratios par nature de poste. Le tableau suivant présente les ratios appliqués.

Nature de poste	Ratio
Mécanique	0.50%
Electricité / Conduite / Ventilation / Tuyauterie / Second œuvre	0.25%
Autres corps de métier	0.00%

Tableau 12 - Ratios appliqués par nature de poste pour les pièces de rechange

4. Estimation du coût de base

4.1 Méthodologie

Les coûts estimés des installations conventionnelles de surface couvrent pour l'ensemble des tranches les fournitures et prestations suivantes :

- Les terrassements et VRD dans l'emprise des bâtiments ;
- L'entreposage des verses hors aménagement des zones d'accueil (terrassement, plateforme, récupération des eaux de ruissellement,... chiffrés en SS5) ;
- Les travaux de génie civil de gros-œuvre et second-œuvre ;
- Les équipements et mobiliers ;
- La production locale d'utilités ;
- La distribution et récupération des fluides ;
- Les réseaux électriques en aval des sous-stations électriques HTA/BT et HTA/HTA ;
- Les réseaux CFI et CC de bas niveau ;
- Les réseaux de mise à la terre ;
- Le chauffage et la climatisation des locaux.

Ces investissements sont tous réalisés en 2 tranches :

- Investissement tranche 1 : construction des ouvrages, approvisionnement des équipements et aménagement de la première tranche de la plateforme d'accueil des verses ;
- Autres tranches de construction : les bâtiments de surface conventionnels sont réalisés en très grande majorité en tranche 1, ces autres tranches concernent uniquement l'extension des verses et la construction des bâtiments 046 et 160 en remplacement de l'ETE à l'horizon 2060 (cf. paragraphe 2.3.1).

4.1.1 Bâtiments

Bâtiments

Les bâtiments conventionnels sont estimés sur la base :

- D'une surface de plancher (m²) ;
- De prix unitaires en €/m² différenciés en fonction de la typologie de bâtiment (ouvrage béton plein pied, R+1, R+2, charpente, ...). Ces prix moyens composites couvrent les fournitures et travaux pour l'ensemble des corps d'états (génie civil gros-œuvre & second-œuvre, tuyauterie, électricité, contrôle commande, ...).

Equipements

Les équipements propres aux installations conventionnelles ont été évalués sur la base :

- D'une liste d'équipements + caractéristiques associées ;
- De prix unitaires.

Parkings et aires de stationnement

L'estimation des parkings et aires de stationnement est réalisée à partir :

- D'une surface (m²) ;
- De prix unitaires en €/m² intégrant les travaux de préparation de sol, de revêtement, la collecte et l'évacuation des eaux, ainsi que l'éclairage.

4.1.2 Verses

Le coût de l'entreposage des verses est estimé à partir :

- De l'emprise au sol de l'entreposage ;
- Des volumes foisonnés de remblais en verses à traiter ;
- De prix moyens unitaires moyens (étanchéité, mouvements de terres).

4.2 Périmètre et limites de prestations

Sont inclus dans cette estimation

- Les coûts des travaux de l'ensemble des tranches de construction ;
- Le démantèlement : déconstruction des ouvrages ;
- La jouvence des installations : renouvellement à l'identique des ouvrages et équipements, en substitution des ouvrages et équipements à l'issue de leur durée de vie.

Les coûts présentés comprennent :

- Les études fournisseurs ;
- Les fournitures et approvisionnements ;
- La préfabrication ;
- L'emballage et le transport sur site ;
- Le montage (en usine et sur site) ;
- Les essais (en usine et sur site) ;
- Les premières dotations de pièces de rechange.

Sont exclus de cette estimation

- Les coûts de la maîtrise d'œuvre de conception en tranche 1 ;

- Les coûts de la maîtrise d'ouvrage en tranche 1 ;
- les aléas de réalisation ;
- les assurances, les impôts et taxes.

4.3 Investissement de la tranche 1

Le coût d'investissement comprend :

- Les ouvrages conventionnels SS3 ;
- La création des aires de stationnement et des parkings ;
- Les verses (étanchéité et mise en stock). Pour mémoire le transport en surface du marinage est comptabilisé dans le sous-système 4 lié aux travaux souterrains.

Le tableau ci-dessous synthétise la décomposition des coûts d'investissement de la tranche 1 aux conditions économiques de 2012.

	Total	VRD	Gros œuvre	Second œuvre	Equipnts principaux	Electricité	Conduite	Ventilation	Tuyauterie	Frais de chantier	
<i>Zone puits</i>	21 M€	2.84 M€	3.88 M€	6.60 M€	4.38 M€	2.62 M€	0.19 M€	0.20 M€	0.29 M€	0.21 M€	
<i>Zone descenderies</i>	81 M€	5.12 M€	7.82 M€	13.30 M€	47.19 M€	5.38 M€	0.38 M€	0.37 M€	0.59 M€	0.43 M€	
<i>Verses</i>	79 M€	79.11 M€									
Total M&T	181 M€	87.1 M€	11.7 M€	19.9 M€	51.6 M€	8.0 M€	0.6 M€	0.6 M€	0.9 M€	0.6 M€	
<i>MOe de conception</i>		cf. note MOe/MOA									
<i>MOe de réalisation</i>	10.85 M€										
Total MOe	11 M€										
<i>AMO réglementaires</i>		cf. note MOe/MOA									
<i>MOA</i>		cf. note MOe/MOA									
Total MOA											
Total	192 M€										

Tableau 13 - Décomposition des coûts d'investissement de la tranche 1

4.4 Autres tranches de construction

Les ouvrages conventionnels sont tous construits en T1, ce poste concerne uniquement l'extension des verses au-delà de la Tranche 1.

Le tableau ci-dessous synthétise la décomposition des coûts d'investissement des tranches ultérieures aux conditions économiques de 2012.

	Total	VRD	Gros œuvre	Second œuvre	Equipnts principaux	Electricité	Conduite	Ventilation	Tuyauterie	Frais de chantier	
<i>Zone puits</i>	0 M€	0.00 M€	0.00 M€	0.00 M€	0.00 M€	0.00 M€	0.00 M€	0.00 M€	0.00 M€	0.00 M€	
<i>Zone descenderies</i>	2 M€	0.14 M€	0.58 M€	1.03 M€	0.00 M€	0.21 M€	0.02 M€	0.05 M€	0.03 M€	0.02 M€	
<i>Verses</i>	174 M€	174.46 M€									
Total M&T	177 M€	174.6 M€	0.6 M€	1.0 M€	0.0 M€	0.2 M€	0.0 M€	0.1 M€	0.0 M€	0.0 M€	
<i>MOe de conception</i>	3.53 M€										
<i>MOe de réalisation</i>	10.59 M€										
Total MOe	14 M€										
<i>AMO réglementaires</i>	0.88 M€										
<i>MOA</i>	5.30 M€										
Total MOA	6 M€										
Total	197 M€										

Tableau 14 - Décomposition des coûts d'investissement des autres tranches de construction

4.5 Jouvence

Les tableaux ci-dessous synthétisent la décomposition des coûts de jouvence des bâtiments aux conditions économiques de 2012.

	Total	VRD	Gros œuvre	Second œuvre	Equipnts principaux	Electricité	Conduite	Ventilation	Tuyauterie	Frais de chantier
<i>Zone puits</i>	50.7 M€	5.09 M€	3.15 M€	16.19 M€	9.37 M€	14.47 M€	1.01 M€	1.07 M€	0.35 M€	0.00 M€
<i>Zone descenderies</i>	154.1 M€	10.08 M€	7.72 M€	32.36 M€	71.76 M€	27.45 M€	1.96 M€	2.08 M€	0.73 M€	0.00 M€
<i>Verses</i>	44.8 M€	44.80 M€								
Total zones	250 M€	60.0 M€	10.9 M€	48.5 M€	81.1 M€	41.9 M€	3.0 M€	3.2 M€	1.1 M€	0.0 M€
<i>MOe de conception</i>	4.99 M€									
<i>MOe de réalisation</i>	14.98 M€									
Total MOe	20 M€									
<i>AMO réglementaires</i>	1.25 M€									
<i>MOA</i>	7.49 M€									
Total MOA	9 M€									
Total	278 M€									

Tableau 15 - Décomposition des coûts de jouvence

4.6 Démantèlement

Les coûts de démantèlement sont estimés à 5% des coûts de construction selon des REX fournis par les producteurs. Les coûts des verses sont exclus de l'assiette d'investissement sur laquelle s'applique ce ratio.

Le tableau ci-dessous synthétise la décomposition des coûts de démantèlement des bâtiments aux conditions économiques de 2012.

	Total	Zone puits	Zone descenderies
<i>Bâtiments conventionnels</i>	5.2 M€	1.06 M€	4.13 M€
<i>Verses</i>	0.5 M€	0.49 M€	0.00 M€
Total M&T	6 M€	1.6 M€	4.1 M€
<i>MOe de conception</i>	0.11 M€		
<i>MOe de réalisation</i>	0.34 M€		
Total MOe	0.5 M€		
<i>AMO réglementaires</i>	0.03 M€		
<i>MOA</i>	0.17 M€		
Total MOA	0.2 M€		
Total	6 M€		

Tableau 16 - Décomposition des coûts de démantèlement

4.7 Pièces de rechange

Le tableau ci-dessous synthétise la décomposition des coûts de pièces de rechange aux conditions économiques de 2012.

	Assiette PdR	Coût PdR
<i>Tranche 1</i>	66.5 M€	38.6 M€
<i>Tranches ultérieures</i>	0.7 M€	0.2 M€

Tableau 17 - Décomposition des coûts des pièces de rechange

4.8 Synthèse des investissements

Le tableau suivant synthétise l'ensemble des investissements présentés en rappelant les coûts de MOe, de MOA et d'AMO réglementaires.

	T1	Tu	Déman- tèment	Jouvence	Total
Zone puits (y/c verses)	100.3 M€	174.5 M€	1.6 M€	95.5 M€	372 M€
Zone descenderies	80.6 M€	2.1 M€	4.1 M€	154.1 M€	241 M€
Total M&T	181 M€	177 M€	6 M€	250 M€	613 M€
MOe de conception		3.5 M€	0.1 M€	5.0 M€	9 M€
MOe de réalisation	11.0 M€	10.6 M€	0.3 M€	15.0 M€	37 M€
Total MOe	11 M€	14 M€	0 M€	20 M€	46 M€
AMO réglementaires		0.9 M€	0.0 M€	1.2 M€	2 M€
MOA		5.3 M€	0.2 M€	7.5 M€	13 M€
Total MOA		6 M€	0 M€	9 M€	15 M€
Total	192 M€	197 M€	6 M€	278 M€	673 M€

Tableau 18 - Synthèse des coûts d'investissement

4.9 Analyse des écarts entre J_{esq} 05 et J_{aps} 03b

4.9.1 Synthèse des écarts

L'évolution financière entre J_{esq} 05 et J_{aps} 03b est de -144,8 M€, répartis en :

- Bâtiments conventionnels : - 17,9 M€ ;
- Verses : - 130 M€.

4.9.2 Commentaires

Bâtiments conventionnels de surface

L'évolution du coût des bâtiments conventionnels sur l'ensemble des phases est liée à 3 facteurs :

- Un gain résultant de la réduction des surfaces construites (cf § 2.3), soit 2745 m² de bâtiment et de 1600 m² d'héliport évalués évalué à - 21,4 M€ ;
- La suppression d'une jouvence liée à la mutualisation de fonctions en tranche 1 avec celles des installations de surface du laboratoire souterrain (cf. 2.3.1) : - 0,3 M€
- Des transferts entre les Sous-systèmes SS3 et SS5 : +11,4 M€ :
 - ✓ Regroupement des postes de garde SS5 sur SS3 : +14,4 M€ ;
 - ✓ Transfert d'une caserne de pompier de SS3 vers SS5 : -3,0 M€.
- La suppression d'une provision de 2,5 M€ en T1 soit 7,6 M€ sur l'ensemble des phases pour création d'un laboratoire de recherche.

Verses

La baisse des coûts des verses de - 130 M€ est la résultante :

- De l'augmentation de 27% des volumes de verses suite à l'extension de la surface de stockage de la zone HA. Surcoût : +37,6 M€ ;
- Des optimisations techniques décrites au §2.3.3 : -11,9 M€ ;
 - ✓ 40 500 m² de surface de plateforme ;
 - ✓ 0,5 m de couche fertile en moins sur les verses mortes.
- Du gain de -69,7 M€ généré par une révision des prix moyens au m² des systèmes d'étanchéité. Nouvelles hypothèses de chiffrage :
 - ✓ 2 couches au lieu de 4 sur l'ensemble de la surface.
- De la correction d'un doublon relatif au transport du marinage entre les périmètres des Sous-Systèmes SS5 et SS4. Gain associé de -86 M€.

4.10 Chronique de dépenses

La chronique de dépenses est calculée selon les hypothèses décrites dans la note « Hypothèses économiques et calendaires ». Elle est ainsi caractérisée par plusieurs périodes :

- 2021 - 2026 : investissement de la tranche 1 ;
- 2044 - 2139 : jouvence des installations ;
- 2029 - 2144 : Extension des verses ;
- 2145 - 2154 : déconstruction des installations.

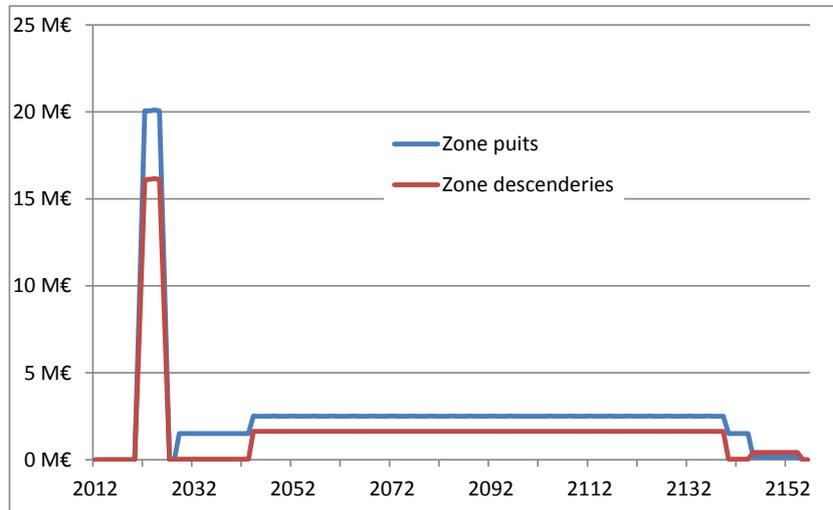


Figure 3 - Chronogramme des dépenses pour le coût de base

ANNEXE 1 – Zone descenderies

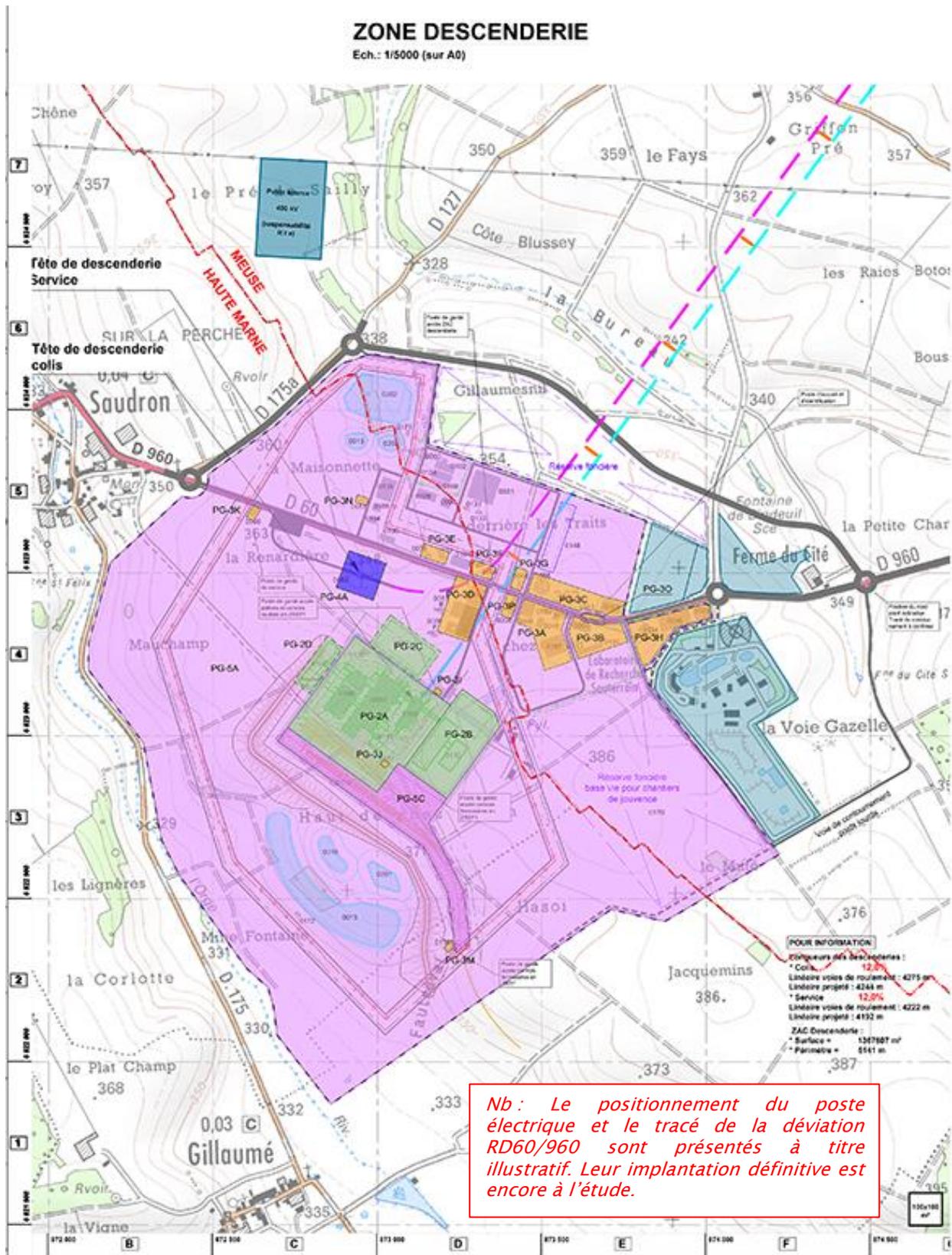


Figure 4 – Zone « Descenderies »

ANNEXE 2 – Zone puits

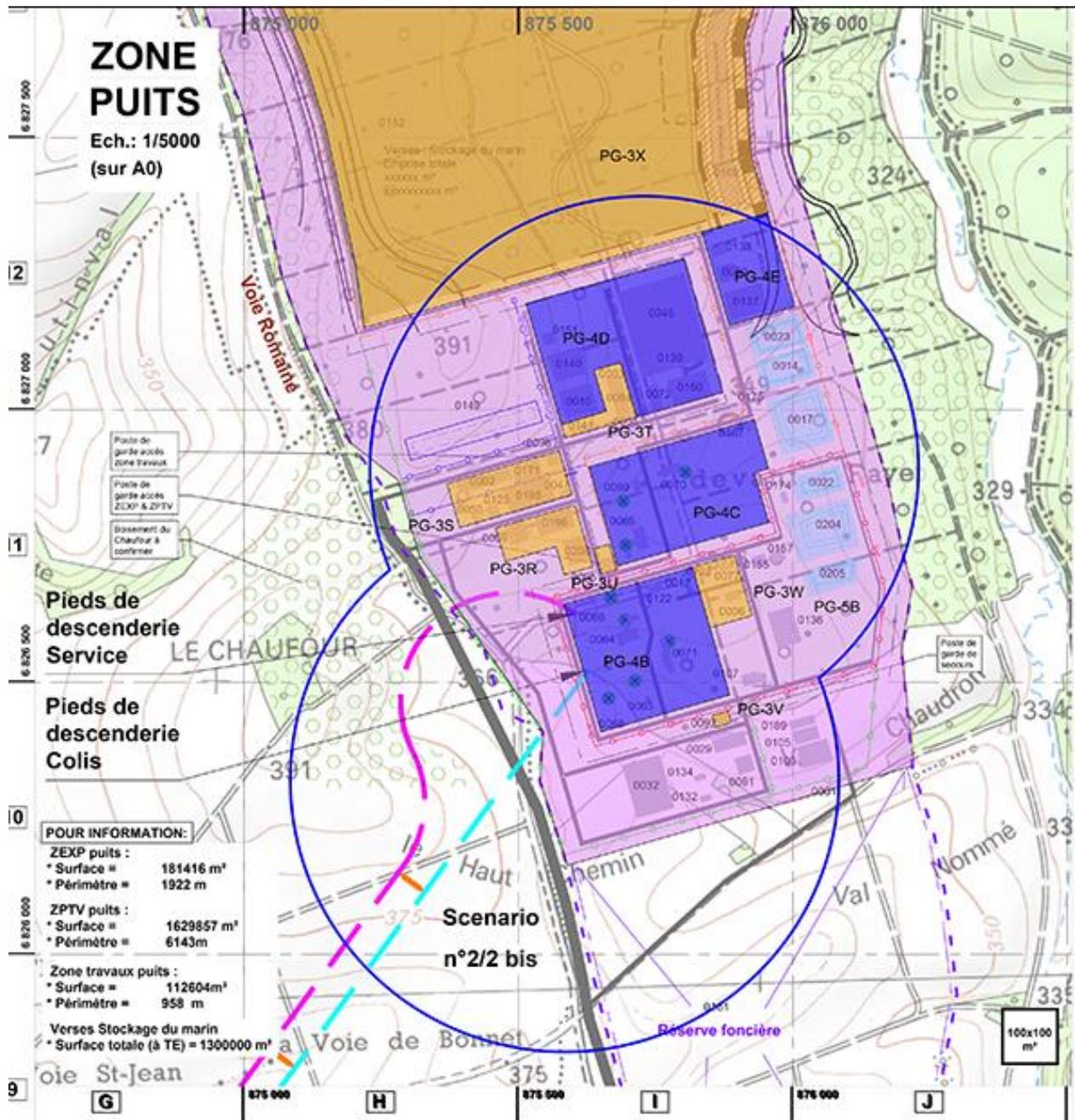


Figure 5 - Zone « Puits » (scénario d'implantation 2/2bis)

CHIFFRAGE CIGÉO EN PHASE ESQUISSE

Estimation du coût de base

Liaisons surface-fond et ouvrages souterrains (SS4)

Identification

CG.TE.F.NTE.AMOA.EEE.4000.14.0063/B

Octobre 2014

Pages : **21**

SOMMAIRE

1.	Objet du document	5
2.	Conception et dimensionnement de l'architecture souterraine	5
2.1	<i>Evolution de la conception entre J_{esq} 05 et J_{aps} 03b</i>	5
2.2	<i>Principe de conception</i>	5
2.2.1	Liaisons surface – fond	6
2.2.2	Zones de soutien logistique	7
2.2.3	Zone MAVL	7
2.2.4	Inventaire MAVL	8
2.2.5	Zone HA0 (déchets HA moyennement exothermiques)	10
2.2.6	Zone HA1/2 (déchets HA fortement exothermiques)	11
2.2.7	Synthèse des métrés	13
2.3	<i>Optimisations associées à la conception des ouvrages souterrains</i>	13
3.	Méthodologie de chiffrage	14
3.1	<i>Investissements de la tranche 1</i>	14
3.2	<i>Maîtrise d'œuvre, maîtrise d'ouvrage et AMO réglementaires</i>	15
3.3	<i>Démantèlement et fermeture</i>	15
3.4	<i>Jouvence</i>	15
3.5	<i>Pièces de rechange</i>	15
4.	Estimation du coût de base	15
4.1	<i>Périmètre et limites de prestations</i>	16
4.2	<i>Investissement de la tranche 1</i>	16
4.3	<i>Autres tranches de construction</i>	16
4.4	<i>Jouvence</i>	17
4.5	<i>Démantèlement et fermeture</i>	18
4.6	<i>Pièces de rechange</i>	18
4.7	<i>Synthèse des investissements</i>	19
4.8	<i>Analyse des écarts entre Jesq05 et Japs03b</i>	19
4.9	<i>Chronique de dépenses</i>	19

TABLES DES ILLUSTRATIONS

Figures

Figure 1 - Architecture souterraine à terminaison J _{esq} 5	6
Figure 2 - Architecture souterraine à terminaison J _{aps} 03b	6
Figure 3 - Plan d'ensemble des zones de soutien logistique (ZSL)	7
Figure 4 - Plan de la zone MAVL T1 et TU	8
Figure 5 - Quartier HA0	10
Figure 6 - hypothèse de dimensionnement de la zone HA0	11
Figure 7 - Métrés zone HA0	11
Figure 8 - Plan masse de la zone HA1/2 à terminaison	12
Figure 9 - Hypothèses de dimensionnement de la zone HA1/2	12
Figure 10 - Métrés Zone HA1/2	13
Figure 11 - Chronogramme des dépenses pour le coût de base	20

Tableaux

Tableau 1 - Nombre d'alvéoles MAVL par type de colis	9
Tableau 2 - Métrés zone MAVL	9
Tableau 3 - Synthèse des métrés	13
Tableau 4 - Taux de MOe, MOA et AMO réglementaires	15
Tableau 5 - Ratios appliqués par nature de poste pour les pièces de rechange	15
Tableau 6 - Décomposition du coût d'investissement de l'architecture souterraine en tranche 1	16
Tableau 7 - Décomposition du coût d'investissement de l'architecture souterraine pour les tranches ultérieures	17
Tableau 8 - Décomposition des coûts de jouvence des équipements des ouvrages souterrains	17
Tableau 9 - Décomposition du coût des travaux souterrains de fermeture	18
Tableau 10 - Tableau de synthèse des coûts de pièces de rechange	18
Tableau 11 - Tableau de synthèse des coûts d'investissement	19
Tableau 12 - Analyse des écarts	19

1. Objet du document

Ce document a pour objet de présenter le chiffrage du coût de base d'investissement des liaisons surface fond et des ouvrages souterrains constituant le sous-système 4 (SS4).

Il présente les coûts :

- De construction des ouvrages (y compris le transport du marin en surface) ;
- De jouvence des installations ;
- De démantèlement des équipements et de fermeture des ouvrages en fin de vie.

Cette note s'inscrit dans le cadre du processus d'optimisation de l'esquisse aboutissant au choix d'une solution d'ensemble servant de référence pour la constitution du dossier d'APS (jalons J_{aps} 03b).

2. Conception et dimensionnement de l'architecture souterraine

2.1 Evolution de la conception entre J_{esq} 05 et J_{aps} 03b

La conception de référence de l'architecture souterraine présentée dans la suite du document a été réalisée sur la base de :

- La prise en compte du nouveau planning objectif intégrant les suites à donner au débat public sur le projet Cigéo (cf. JORF n°0108 du 10 mai 2014, page 7851, texte n° 8) ;
- La prise en compte de la solution d'ensemble retenue au jalons J_{aps} 03b intégrant les différentes voies d'optimisation, les études en sensibilité et les sujets d'études retenus lors de la première phase des études d'APS ;
- L'intégration du PIGD version D.

Cette nouvelle conception, validée en termes de choix techniques par la Maîtrise d'Ouvrage (MOA) et la Maîtrise d'œuvre Système (MOe-S), constitue la solution d'ensemble système de référence à développer pour la suite de l'APS.

2.2 Principe de conception

Les schémas suivants présentent de manière macroscopique les évolutions d'architectures souterraines entre J_{esq}05 et J_{aps}03b, à savoir :

- La localisation de la zone HA0 à l'Est de la Zira pour optimiser l'utilisation de l'emprise ;
- Le dimensionnement des zones de stockage HA sur la base de nouvelles évaluations thermo-hydro-mécaniques ;
- La réalisation de la boucle MAVL en deux phases, permettant un développement progressif de l'investissement et donnant ainsi plus de flexibilité pour la poursuite du développement de la zone MAVL.

A noter que la suppression des boucles de retournement associée à un creusement au tunnelier (zone HA) et l'optimisation du nombre d'alvéoles MAVL étaient déjà pris en compte dans le cadre du chiffrage 2013.

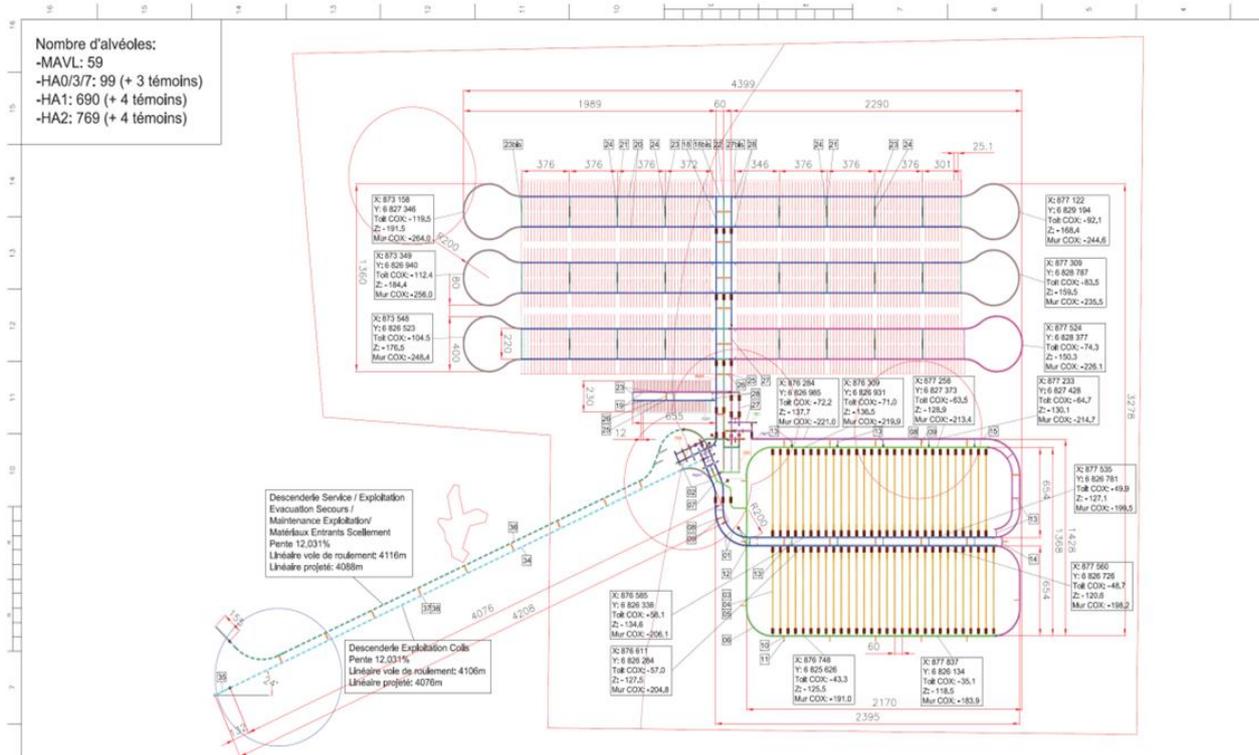


Figure 1 - Architecture souterraine à terminaison J₅

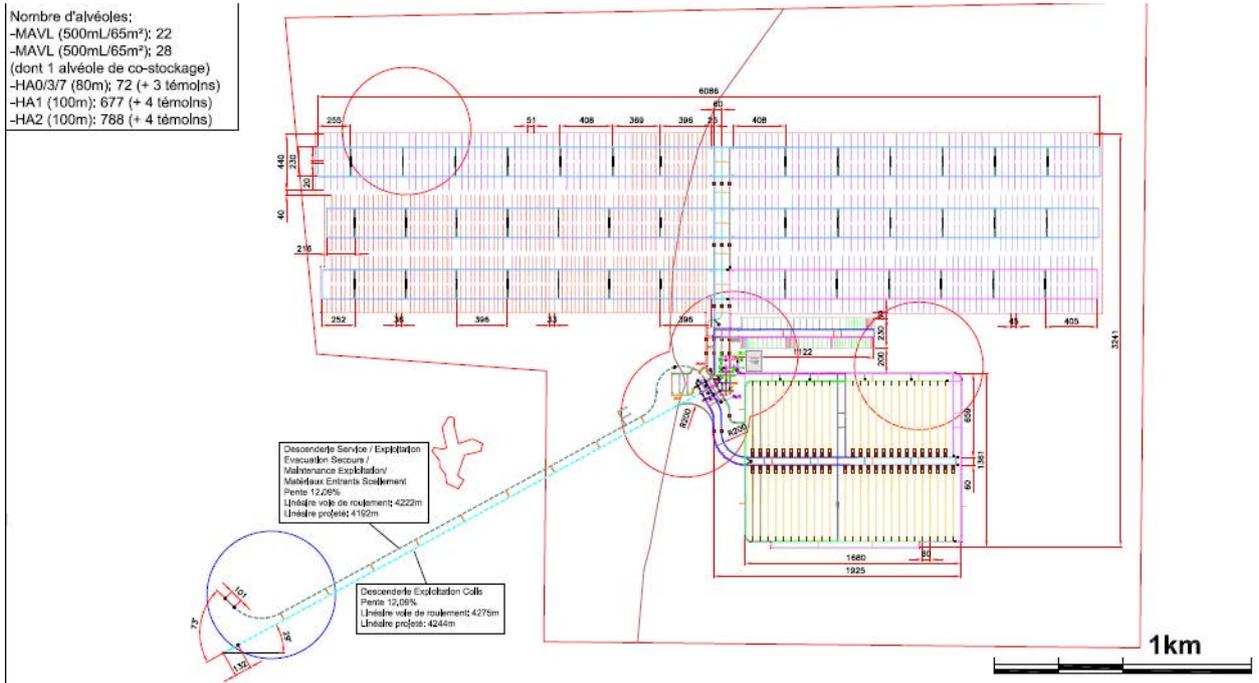


Figure 2 - Architecture souterraine à terminaison J_{aps}

2.2.1 Liasons surface – fond

Les liaisons entre la surface et le niveau du stockage sont assurées par 5 puits et 2 descenderies.

La première descenderie est dédiée au transfert des hottes contenant les colis de stockage depuis l’installation nucléaire de surface vers l’installation souterraine via un funiculaire.

La deuxième descenderie dite de service, permet de réaliser toutes les opérations liées à l’exploitation autres que le transfert des colis : transfert des équipements de maintenance, flux d’évacuation et secours.

En zone puits, 2 puits sont dédiés à l'exploitation et 3 aux travaux. L'un des deux puits d'exploitation permet le transfert du personnel intervenant dans la zone nucléaire ainsi que l'apport d'air frais dans cette zone nucléaire. L'autre puits d'exploitation est dédié à l'extraction de l'air vicié des galeries et des alvéoles. En zone travaux, un premier puits permet le transfert du personnel intervenant dans cette zone ainsi que l'apport d'air frais pour les activités travaux. Le deuxième puits assure les flux de matériaux et notamment l'extraction des déblais et le troisième puits permet l'extraction de l'air vicié lié aux activités travaux.

2.2.2 Zones de soutien logistique

Les installations comportent deux zones de soutien logistique (ZSL) distinctes, une dédiée à l'exploitation et une aux travaux. La zone travaux se développe au pied des puits « travaux » et la zone exploitation au pied des descenderies « colis » et « service exploitation ». La séparation des fonctions est assurée par une segmentation physique, et le passage d'une partie à l'autre n'est pas possible en conditions normales.

La ZSL exploitation a été déplacée à l'Est du pied de la descenderie colis pour favoriser les flux en exploitation (réduction des croisements, flux process/personnels, etc.).

Une zone est prévue pour la réalisation d'essais techniques (essais de scellement, démonstrateur alvéole MAVL de grande section...).



Figure 3 - Plan d'ensemble des zones de soutien logistique (ZSL)

2.2.3 Zone MAVL

2.2.3.1 Organisation de la zone MAVL

Le dimensionnement de la capacité de stockage est fondé sur le PIGD v.D.

La zone MAVL est organisée autour :

- De 2 galeries de liaison dédiées à l'exploitation ;
- Des alvéoles de stockage répartis de part et d'autre, des galeries de retour d'air en extrémité des alvéoles ;
- D'une galerie de travaux qui assure la logistique de chantier.

Les alvéoles stockage MAVL sont d'une section de l'ordre de 65m² et de longueur utile de 500 m.

Le déploiement de la zone MAVL se fait en 2 phases :

- 1 ère phase : Réalisation d'une première boucle (T1) qui permet la construction de 22 alvéoles :
 - ✓ 4 alvéoles en phase industrielle pilote (T1) ;
 - ✓ 18 alvéoles en tranche ultérieures (Tu).

- 2^{ème} phase : Réalisation d'une deuxième boucle (TU) dans le prolongement de la première boucle, permettant de réaliser 28 alvéoles supplémentaires.

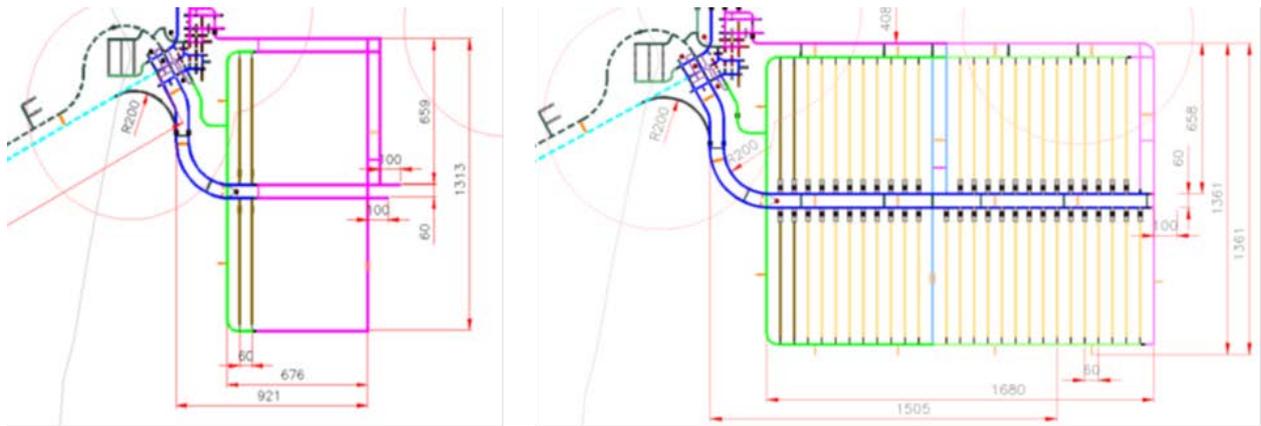


Figure 4 - Plan de la zone MAVL T1 et TU

Les galeries de liaison sont creusées au tunnelier dans le prolongement des descenderies. Les deux tunneliers ayant servi au creusement des descenderies continuent leurs trajets pour creuser les galeries de liaison puis sont démontés. Les galeries de ventilations, les recoupes, et les alvéoles de stockage sont alors réalisées à la MAP.

Les galeries et recoupes sont réalisées avant la mise en exploitation de Cigéo tandis que les alvéoles de stockage sont construits au fur et à mesure du besoin à la MAP. Le schéma d'exploitation est chassant en ce qui concerne l'exploitation (éloignement de l'activité exploitation vis-à-vis de la ZSL exploitation) et rabattant pour les travaux (rapprochement des activités travaux par rapport à la ZSL travaux).

La deuxième boucle qui est le prolongement de la T1, se construit au fur et à mesure du besoin des 28 alvéoles de stockage.

Le schéma d'exploitation est chassant en ce qui concerne l'exploitation (éloignement de l'activité exploitation vis-à-vis de la ZSL exploitation) et rabattant pour les travaux (rapprochement des activités travaux par rapport à la ZSL travaux).

2.2.4 Inventaire MAVL

La constitution du quartier MAVL prend en compte :

- Arrangement des colis de stockage en alvéole et co-stockage géométrique :
Les colis primaires livrés par les producteurs présentent une vingtaine de géométries différentes : CBFC'2, CSD-C, fût 200 L, fût EIP... La prise en charge dans le stockage nécessite une standardisation au niveau des conteneurs de stockage qui permet ainsi de traiter l'ensemble des géométries des colis primaires avec 7 modèles de conteneurs. Ces conteneurs dénommés CS1 à CS7 sont stockés dans des alvéoles dédiés à chaque géométrie.
L'arrangement considéré des colis de stockage en alvéole :
 - ✓ CS1 à CS5 : 3 colonnes et 2 niveaux ;
 - ✓ CS6 et CS7 : 1 colonne et 1 niveau.
 Le co-stockage géométrique consiste à stocker dans une même alvéole des conteneurs de stockage de modèle différent. A ce stade, les regroupements suivants sont pris en compte :
 - ✓ Regroupement possible de CS1, CS4 et CS5 ;
 - ✓ Regroupement possible de CS2 et CS3.
- Le co-stockage physico-chimique :
La centaine de famille de déchets primaires a été classée en 6 catégories, les déchets au sein d'une même typologie sont compatibles :
 - ✓ La catégorie MAVL1 regroupe les déchets contenant une quantité significative de sels.
 - ✓ La catégorie MAVL2 regroupe les enrobés bitumineux.
 - ✓ La catégorie MAVL3 regroupe des déchets contenant une part significative de matières organiques.

- ✓ La catégorie MAVL4 regroupe des déchets non ou faiblement exothermiques ne contenant pas une quantité significative de matière organique mais potentiellement générateurs de gaz de radiolyse interne.
- ✓ La catégorie MAVL5 regroupe les déchets non ou faiblement exothermiques ne contenant pas de matière organique ni de sels et ne générant pas de gaz par radiolyse interne.
- ✓ La catégorie MAVL6 regroupe les déchets vitrifiés non ou faiblement exothermiques.

Le co-stockage physico-chimique consiste à stocker dans une même alvéole des déchets de catégorie différente. Cette optimisation nécessite une vérification de l'absence d'interaction rédhitoire. Les déchets de type MAVL4 et MAVL5 sont considérés co-stockables.

- La diminution de la chambre de manutention 39 à 30m (en intégrant la zone d'accostage) ;
- Un déploiement chassant.

Le total des alvéoles réalisés de 500m est de 50.

Le nombre d'alvéoles par type de colis MAVL est récapitulé dans le tableau suivant.

	Quantité T1	Quantité >T1
CS1	0	1
CS1/4/5	0	7
CS1/5	0	9
CS2	1	8
CS2/3	1	6
CS3	1	0
CS4	1	9
CS4/5	0	3
CS5/6	0	2
CS7	0	1
Total	4	46

Tableau 1 - Nombre d'alvéoles MAVL par type de colis

Construction et fermeture	Diam. excavé	Diam. utile	Ep vouss.	Ep revet.	Ep soutèn.	Ep mat. compr.	Long. totale	Méthode de creus.
Alvéole de stockage	9.3	7.5		0.7	0.2		25 150	MAP
Cellule de manutention+zone d'accostage	12.4	10		1	0.2		1 500	MAP
Galerie d'accès alvéole	9.95	7.9		0.825	0.2		1 650	MAP
Galerie de liaison creusée par tunnelier	9.6	8	0.6			0.2	2 711	Tunnelier
Galerie de liaison exploitation	10.2	8		0.9	0.2		1 829	MAP
Galerie de liaison travaux MAP	10.2	8		0.9	0.2		210	MAP
Galerie de liaison travaux MAP (souple)	8.5			0	0.25		5 630	MAP
Galerie de retour d'air post alvéole	2	1.13			0.435		1 200	Micro tunnelier
Galerie de retour d'air MAVL	10.2	8		0.9	0.2		4 988	MAP
Local technique électricité	10.7	8.6		0.85	0.2		440	MAP
Local technique électricité (accès)	6.2	5		0.4	0.2		155	MAP
Local technique électricité borgne	7.5	6		0.55	0.2		245	MAP
Niche technique électricité borgne Cfi	7.5	6		0.55	0.2		10	MAP
Recoupe Evacuation/Secours	6.2	5		0.4	0.2		400	MAP
Recoupe Evacuation/Secours (compartimentage)	8.3	6.7		0.6	0.2		200	MAP

Tableau 2 - Mètres zone MAVL

2.2.5 Zone HA0 (déchets HA moyennement exothermiques)

Le quartier HA0 est organisé autour de 2 galeries d'accès desservant des alvéoles de stockage réparties de part et d'autre. Des galeries de liaison travaux et exploitation, réutilisées pour le quartier HA1/2, relient le quartier HA0 à la zone de soutien logistique. L'ensemble des galeries est réalisé à la MAP avant la mise en exploitation de Cigéo. Les alvéoles ont une longueur de 80 m.

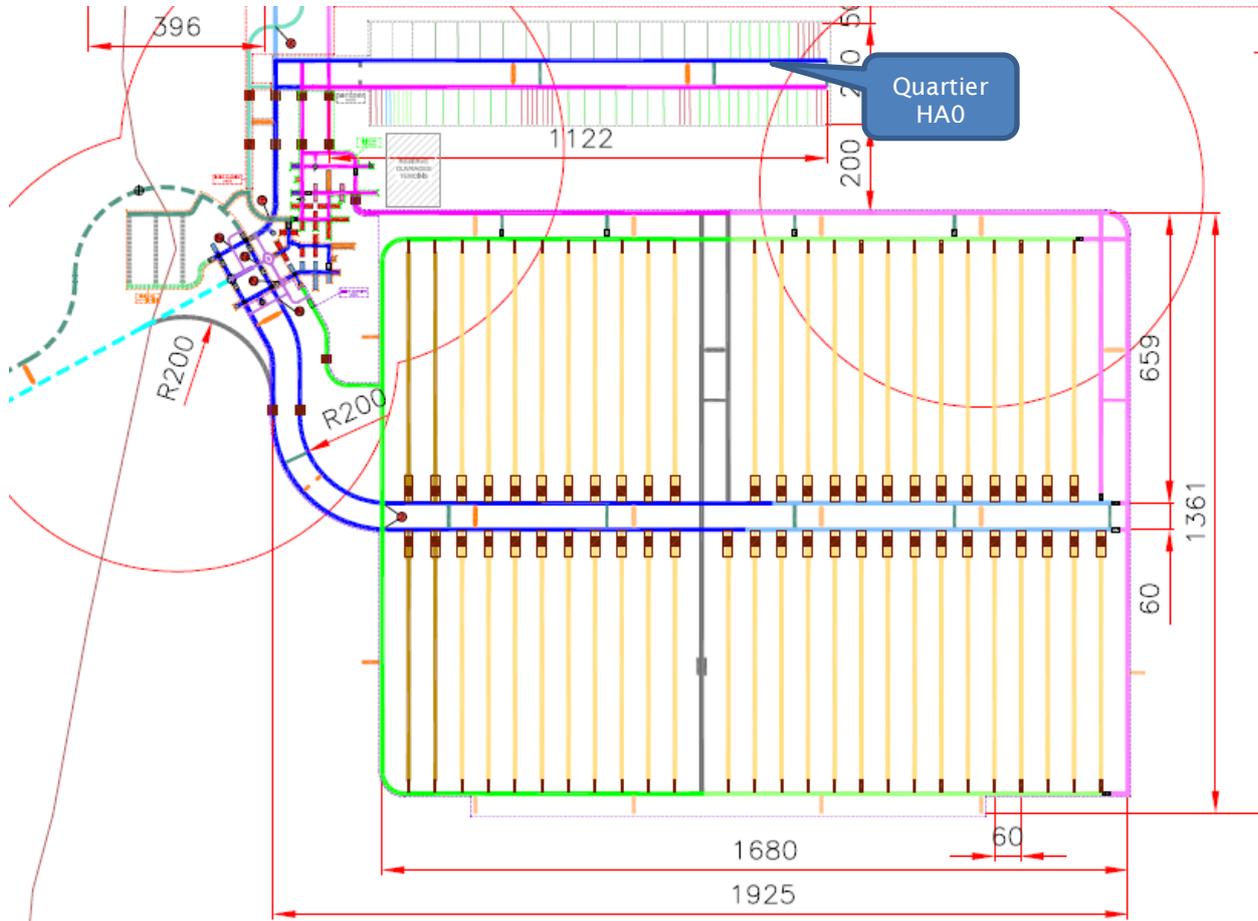


Figure 5 - Quartier HA0

Le dimensionnement de la capacité de stockage est fondé sur le PIGD version D.

La puissance thermique des verres AVM a été majorée de 10 % pour tenir compte des incertitudes (valeur fournie par le CEA).

Le dimensionnement de la zone HA0 conduit à 75 alvéoles (dont 3 alvéoles témoins).

Famille de colis		Puissance thermique (W/colis)	Nombre de colis par alvéole	Nombre d'alvéoles	Entraxe d'alvéole, Px (m)
CEA-1070, CEA-1080, CEA-350, CEA-1500	Verres AVM, verres Atalante, sources HA	193	64	13	51
		132	64	13	36
		77	64	19	22
		33	64	5	9,5
COG-150	Verres UMo	40	45	20	11,5
CEA-200, CEA-1190	Verres Piver et verres de laboratoire	30		2	8,5

Figure 6 - hypothèse de dimensionnement de la zone HA0

Construction et fermeture	Diam. excavé	Diam. utile	Ep. revet.	Ep. sout.	Long. TOTALE	Méth. de creus.
Alvéoles HA0	0.805				6000	Micro tunnelier
Galeries d'accès HA0	10.2	8	0.9	0.2	2485	MAP
Galeries de liaison HA0	10	8	0.8	0.2	440	MAP
Galeries de liaison HA0 (souple)	8.5	7	0	0.25	100	MAP
Galeries techniques électricité HA0	10.7	8.6	0.85	0.2	120	MAP
Galeries techniques électricité HA0 (accès)	6.2	5	0.4	0.2	20	MAP
Recoupes d'évacuation/secours HA0	8.3	6.7	0.6	0.2	30	MAP
Recoupes d'évacuation/secours HA0	6.2	5	0.4	0.2	150	MAP

Figure 7 - Mètres zone HA0

2.2.6 Zone HA1/2 (déchets HA fortement exothermiques)

La zone HA1/2 présente une architecture avec 6 quartiers de stockage répartis de part et d'autre d'un faisceau de liaison.

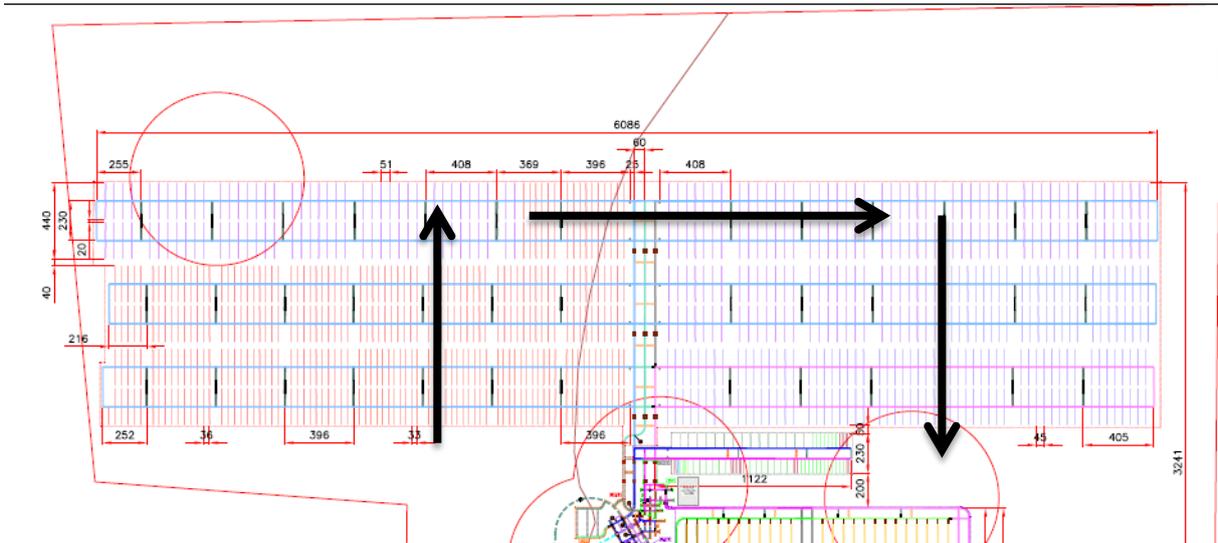


Figure 8 - Plan masse de la zone HA1/2 à terminaison

Le faisceau de liaison comprend 3 galeries pour assurer les activités liées aux travaux et à l'exploitation. Chaque quartier de stockage HA est constitué d'une galerie (considérée creusée à la MAP, mais la possibilité de creuser au tunnelier est étudiée en APS) et d'alvéoles de stockage creusés au micro-tunnelier perpendiculairement à la galerie d'accès. Le déploiement progresse selon un schéma chassant-rabattant, les zones de stockage s'éloignent de la zone de soutien logistique dans un premier temps et se rapprochent de celle-ci dans un second temps. L'ensemble des alvéoles de chaque quartier est réalisé avant la mise en exploitation de celui-ci.

La capacité de stockage est fondée sur le PIGD v.D.

Le dimensionnement de la zone HA1/2 conduit à environ 1 470 alvéoles.

	Famille de colis	Nbre de colis (PIGD vD)	Longueur d'alvéole (m)	Age des colis et puissance thermique à la mise en stockage	Nbre d'alvéoles	Nbre de colis par alvéole	Entraxe d'alvéole, Px (m)
Chronique de référence (2075-2140)	COG-140 COG-810 COG-820 COG-850 COG-860 COG-870 COG-880 COG-890 COG-900 COG-150	7721	100 m	85 ans (275 W/colis)	180 (dont 4 témoins)	44	33
	COG-800	19010		85 ans (345 W/colis)	501	38	36
	COG-200 COG-830	15888		85 ans (365 W/colis)	472 (dont 4 témoins)	34	51
		9268		70 ans (448 W/colis)	320	29	45

Figure 9 - Hypothèses de dimensionnement de la zone HA1/2

Construction et fermeture	Diam. excavé	Diam. utile	Ep. revet.	Ep. sout.	Long. TOTALE	Méth. de creus.
Alvéole HA1/2	0.805				145374	Micro tunnelier
Galerie d'accès HA1/2	10.2	8	0.9	0.2	35520	MAP
Galerie de liaison Evacuation/Secours (souple) HA1/2	8.5	7	0	0.25	1852	MAP
Galerie de liaison exploitation + recoupes exploitation HA1/2	10	8	0.8	0.2	2025	MAP
Galerie de liaison travaux (souple)	8.5	7	0	0.25	1425	MAP
Local technique électricité en recoupe GA HA1/2	8.3	6.7	0.6	0.2	3120	MAP
Local technique électricité GL HA1/2	10.7	8.6	0.85	0.2	480	MAP
Local technique électricité GL (accès) HA1/2	6.2	5	0.4	0.2	120	MAP
Recoupe Evacuation/Secours HA1/2	6.2	5	0.4	0.2	4260	MAP
Recoupe Evacuation/Secours (compartimentage) + Niche de compartimentage HA1/2	8.3	6.7	0.6	0.2	2700	MAP

Figure 10 - Mètres Zone HA1/2

2.2.7 Synthèse des mètres

Ouvrages	Linéaires
Liaisons surface fond	
Descenderies	9,6 km
Puits	2,6 km
Zone de soutien logistique	3,9 km
Zone de stockage MAVL	
Alvéoles MAVL	25,2 km
Galeries MAVL	20,9 km
Zone de stockage HA0	
Alvéoles HA0	6,0 km
Galeries HA0	3,3 km
Zone de stockage HA1/2	
Alvéoles HA1/2	145,4 km
Galeries HA1/2	51,5 km
Total	
Puits	2,6 km
Galeries, descenderies et alvéoles MAVL	114,4 km
Alvéoles HA	151,4 km

Tableau 3 - Synthèse des mètres

2.3 Optimisations associées à la conception des ouvrages souterrains

Les principales opportunités à l'étude en lien avec l'architecture souterraine sont les suivantes :

- zone de stockage MAVL :
 - ✓ Etude de la possibilité d'un stockage direct de certains colis primaires MA-VL sans ajout d'un conteneur de stockage (gain potentiel sur le volume de déchets stocké par alvéole) ;
 - ✓ Mise en œuvre d'alvéoles MA-VL de plus grande section après la réalisation d'un démonstrateur inactif lors de la phase industrielle pilote ;
 - ✓ Cadences de creusement des ouvrages creusés à la MAP plus élevée.
- zone de stockage HA :
 - ✓ Optimisation du dimensionnement thermo-hydro-mécanique de la zone HA en s'appuyant sur la poursuite des travaux de R&D ;
 - ✓ Etude de la possibilité d'allonger la longueur des alvéoles HA1/2 à 150 mètres ;
 - ✓ Optimisation de la chronique de livraison des déchets.

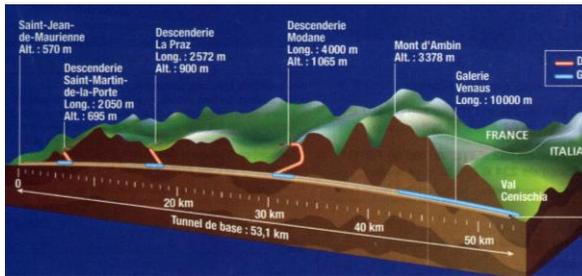
Ces opportunités, ainsi que les risques techniques identifiés (augmentation des diamètres de galeries, épaissement du chemisage HA...) sont présentés dans le document Quantification des aléas, risques et opportunités.

3. Méthodologie de chiffrage

Le chiffrage est présenté aux conditions économiques de janvier 2012 et tous les coûts sont présentés hors taxe.

3.1 Investissements de la tranche 1

Les coûts unitaires sont issus des bases de coûts de la MOe-S qui consolident l'ensemble des projets menés par les entreprises du groupement (avant-projet de tunnels du projet Lyon-Turin ferroviaire, maîtrise d'œuvre complète du tunnel ferroviaire de base du Lötschberg Sud, ...).



Projet Lyon – Turin ferroviaire

Mission d'avant-projet de référence Génie civil

INGEROP a étudié une partie des ouvrages de génie civil et assuré la coordination de l'ensemble du groupement.



Tunnel ferroviaire de base du Lötschberg Sud (Suisse)

Liaison ferroviaire à grande vitesse

2 tubes de 17,6 km de long

Ingénieur Conseil du Maître d'Ouvrage

Géos : études préliminaires et avant-projet du tronçon Raron-Lötschberg, devis général par lot, contrôle des offres, adjudications, négociations des contrats, direction générale des travaux. Planification des travaux, contrôle du budget.

Tout au long de la phase esquisse, le chiffrage réalisé par la MOe-S a fait l'objet de plusieurs niveaux d'évaluation :

- Contrôle par la cellule d'estimation de l'Andra ;
- Audit des méthodes et des outils par la société PwC ;
- Benchmark par rapport à d'autres références dans le cadre de la revue des coûts unitaires d'investissement sur la base de J_{esq} 04. En particulier, l'Andra a associé à la revue des coûts unitaires deux experts extérieurs dans les travaux souterrains :
 - ✓ M. Denis DEFARGUES, ancien directeur pour Bouygues du chantier du Laboratoire Souterrain ;
 - ✓ M. Jean PHILIPPE, président d'honneur de l'AFTES (Association française des tunnels et de l'espace souterrain), ancien directeur ingénierie de la SNCF.

3.2 Maîtrise d'œuvre, maîtrise d'ouvrage et AMO réglementaires

Les hypothèses de chiffrage sont présentées dans la note « Estimation du coût de base de maîtrise d'œuvre et de maîtrise d'ouvrage », le tableau suivant présente les taux retenus.

Tranches	Types	Ratios
T1	MOe de conception	Intégrées au PMT et présentées dans la note MOe/MOA
	MOA	
	AMO réglementaires	
	MOe de réalisation	
Tu	MOe de conception	2%
	MOA	3%
	AMO réglementaires	0.5%
	MOe de réalisation (y/c jouvence et démantèlement)	8% ¹

Tableau 4 - Taux de MOe, MOA et AMO réglementaires

3.3 Démantèlement et fermeture

Les coûts de démantèlement sont établis à partir de ratios appliqués aux postes de M&T, hors essais de qualification.

En s'appuyant sur les REX fournis par les producteurs, la valeur retenue pour le chiffrage est de 10%.

Les hypothèses relatives à la fermeture sont décrites dans la note Hypothèses économiques et calendaires.

3.4 Jouvence

Les hypothèses relatives à la jouvence sont présentées dans la note Hypothèses économiques et calendaires.

3.5 Pièces de rechange

A ce stade des études, le montant annuel des pièces de rechange est estimé sur la base de ratios par nature de poste. Le tableau suivant présente les ratios appliqués.

Natures de poste	Ratios postes de surface	Ratios souterrains
Mécanique	0.50%	
Electricité/Conduite/Ventilation	0.25%	
Tuyauterie	0.25%	NA
Second œuvre	0.25%	NA
GC secondaire	NA	0.25%
Ouvrages de surface liés à SS4	NA	0.15%
Autres corps de métier	0%	

Tableau 5 - Ratios appliqués par nature de poste pour les pièces de rechange

4. Estimation du coût de base

L'estimation du coût de base est réalisée par la MOe-S à partir de données fournies par les différentes MOe-SS pour chacun des sous-systèmes. Ce chapitre synthétise le coût de base associé au périmètre du sous-système 4 « liaison surface-fond et installations souterraines ».

Certains coûts présentés ici à titre indicatif sont consolidés dans des notes de chiffrage distinctes Il s'agit en particulier :

- Des coûts de MOe, de MOA et d'AMO réglementaires (note dédiée) ;
- Des coûts de pièces de rechange (remontés dans le chiffrage de l'exploitation).

¹ Il est fait l'hypothèse d'une réduction de 30 % du ratio de MOe réalisation pour prendre en compte un effet de répétitivité lors des tranches ultérieures.

4.1 Périmètre et limites de prestations

Sont inclus dans cette estimation

- La construction des liaisons surface-fond (puits et descenderies) et des installations souterraines (ZSL et zones MAVL et HA0) en tranche 1 ;
- La construction des installations souterraines pour les tranches ultérieures (zones MAVL et HA1/2) ;
- Le démantèlement des installations en fin de vie et les opérations de fermeture des ouvrages souterrains ;
- La jouvence : renouvellement des équipements au sein de chacune de ces installations.

Les coûts présentés comprennent :

- Les coûts d'études fournisseurs hors phase APS/APD ;
- Les approvisionnements ;
- La fabrication ;
- Le montage ;
- Les essais ;
- La dotation initiale de pièces de rechange.

Sont exclus de cette estimation

- Les coûts de maîtrise d'œuvre système en tranche 1 ;
- Les coûts de maîtrise d'ouvrage en tranche 1 ;
- Les coûts associés aux organismes de contrôles réglementaires (AMO réglementaires) en tranche 1 ;
- Les aléas de réalisation, les risques et opportunités ;
- Les assurances, les impôts et taxes.

4.2 Investissement de la tranche 1

Le tableau ci-dessous synthétise la décomposition des coûts d'investissement de la tranche 1 par ouvrage et par corps de métier.

Ouvrages / Métiers	Total	Ouvrage surface	Creus. / soutèn.	Revêt. définitif	GC second.	Second œuvre	Mécanique	Electricité	Conduite	Ventilation	Frais de chantier
<i>Puits équipés</i>	183 M€	40.0 M€	72.7 M€	27.7 M€	3.8 M€	2.8 M€	10.3 M€	4.0 M€	1.6 M€	17.5 M€	2.3 M€
<i>Descenderies</i>	501 M€	1.0 M€	331.5 M€	14.1 M€	56.0 M€	7.7 M€		52.0 M€	12.2 M€	7.6 M€	19.2 M€
<i>Zone de soutien logistique</i>	214 M€	0.0 M€	121.9 M€	25.4 M€	39.8 M€	8.6 M€	2.1 M€	7.0 M€	1.9 M€	2.7 M€	4.7 M€
<i>Galeries MAVL</i>	513 M€	0.0 M€	313.8 M€	46.3 M€	65.5 M€	6.8 M€		29.5 M€	10.0 M€	27.8 M€	12.9 M€
<i>Alvéoles MAVL</i>	130 M€	0.0 M€	59.2 M€	24.7 M€	29.7 M€	1.8 M€		7.5 M€	0.3 M€	3.7 M€	3.3 M€
<i>Galeries HA</i>	134 M€	0.0 M€	67.1 M€	26.0 M€	22.2 M€	1.4 M€		8.4 M€	1.8 M€	1.8 M€	5.2 M€
<i>Alvéoles HA</i>	19 M€	0.0 M€	6.4 M€	12.1 M€	0.0 M€	0.2 M€		0.0 M€	0.0 M€	0.0 M€	0.0 M€
Total ouvrages	1 694 M€	41 M€	973 M€	176 M€	217 M€	29 M€	12 M€	108 M€	28 M€	61 M€	48 M€
<i>MOe de conception</i>											
<i>MOe de réalisation</i>	186.3 M€										
MOE	186 M€										
<i>AMO Réglementaires</i>											
<i>MOA</i>											
MOA											
Total	1 880 M€										

Tableau 6 - Décomposition du coût d'investissement de l'architecture souterraine en tranche 1

Pour les investissements à réaliser en tranche 1, les coûts de MOe de conception, de MOA et d'AMO réglementaires sont traités globalement et non à l'échelle de chaque sous-système (cf. note « Estimation du coût de base de maîtrise d'œuvre et de maîtrise d'ouvrage »).

4.3 Autres tranches de construction

Le tableau ci-dessous synthétise la décomposition des coûts d'investissement des tranches ultérieures par ouvrage et par corps de métier. Ils sont présentés aux conditions économiques de 2012.

Ouvrages / Métiers	Total	Creus. / soutèn.	Revêt. définitif	GC second.	Second œuvre	Mécanique	Electricité	Conduite	Ventilation	Frais de chantier
<i>Puits équipés</i>	8 M€	0.0 M€	0.0 M€	0.0 M€	0.0 M€	8.0 M€	0.0 M€	0.0 M€	0.0 M€	0.0 M€
<i>Galeries MAVL</i>	350 M€	181.3 M€	55.1 M€	50.7 M€	4.8 M€	0.0 M€	23.1 M€	7.9 M€	18.0 M€	9.2 M€
<i>Alvéoles MAVL</i>	1 479 M€	662.3 M€	284.2 M€	341.4 M€	20.4 M€	0.0 M€	86.1 M€	3.1 M€	43.1 M€	38.9 M€
<i>Galeries HA</i>	2 907 M€	1 287.6 M€	602.6 M€	582.3 M€	31.2 M€	0.0 M€	208.4 M€	44.8 M€	34.1 M€	115.7 M€
<i>Alvéoles HA</i>	1 200 M€	409.2 M€	777.4 M€	0.0 M€	13.0 M€	0.0 M€	0.0 M€	0.0 M€	0.0 M€	0.0 M€
Total ouvrages	5 944 M€	2 540 M€	1 719 M€	974 M€	70 M€	8 M€	318 M€	56 M€	95 M€	164 M€
<i>MOe de conception</i>	118.9 M€									
<i>MOe de réalisation</i>	475.5 M€									
MOE	594 M€									
<i>AMO Réglementaires</i>	29.7 M€									
<i>MOA</i>	178.3 M€									
MOA	208 M€									
Total	6 747 M€									

Tableau 7 - Décomposition du coût d'investissement de l'architecture souterraine pour les tranches ultérieures

4.4 Jouvence

Les tableaux ci-dessous synthétisent la décomposition des coûts de jouvence des installations aux conditions économiques de 2012.

Ouvrages / Métiers	Total	Ouvrage surface	Second œuvre	Ventilation	Electricité	Conduite	Frais de chantier	Mécanique
<i>Puits équipés</i>	145 M€	70 M€	3 M€	20 M€	15 M€	9 M€	0 M€	28 M€
<i>Descenderies</i>	260 M€	3 M€	9 M€	12 M€	172 M€	64 M€	0 M€	0 M€
<i>Zone de soutien logistique</i>	54 M€	0 M€	10 M€	4 M€	27 M€	10 M€	0 M€	4 M€
<i>Galeries MAVL</i>	250 M€	0 M€	9 M€	42 M€	134 M€	65 M€	0 M€	0 M€
<i>Alvéoles MAVL</i>	12 M€	0 M€	0 M€	1 M€	8 M€	3 M€	0 M€	0 M€
<i>Galeries HA</i>	614 M€	0 M€	5 M€	48 M€	346 M€	141 M€	75 M€	0 M€
<i>Alvéoles HA</i>	0 M€	0 M€	0 M€	0 M€	0 M€	0 M€	0 M€	0 M€
Total ouvrages	1 335 M€	73 M€	37 M€	125 M€	702 M€	293 M€	75 M€	32 M€
<i>MOe de conception</i>	26.7 M€							
<i>MOe de réalisation</i>	106.8 M€							
MOE	134 M€							
<i>AMO Réglementaires</i>	6.7 M€							
<i>MOA</i>	40.1 M€							
MOA	47 M€							
Total	1 515 M€							

Tableau 8 - Décomposition des coûts de jouvence des équipements des ouvrages souterrains

4.5 Démantèlement et fermeture

Le tableau ci-dessous synthétise la décomposition des coûts de démantèlement des installations aux conditions économiques de 2012.

	Total
<i>M&T (pour mémoire)</i>	2 018 M€
Ouvrages	Fermeture
<i>Puits équipés</i>	14.8 M€
<i>Descenderies</i>	55.7 M€
<i>Zone de soutien logistique</i>	14.3 M€
<i>Galeries MAVL</i>	64.1 M€
<i>Alvéoles MAVL</i>	87.7 M€
<i>Galeries HA</i>	228.6 M€
<i>Alvéoles HA</i>	55.0 M€
Total fermeture	520 M€
<i>MOe de conception</i>	10.4 M€
<i>MOe de réalisation</i>	41.6 M€
MOE	52 M€
<i>AMO Réglementaires</i>	2.6 M€
<i>MOA</i>	15.6 M€
MOA	18 M€
Total	590 M€

Tableau 9 - Décomposition du coût des travaux souterrains de fermeture

4.6 Pièces de rechange

Le tableau ci-dessous synthétise la décomposition des coûts de pièces de rechange aux conditions économiques de 2012.

	Assiette PdR	Coût
<i>LSF + ZSL</i>	145.5 M€	84.4 M€
<i>Galeries MAVL</i>	69.8 M€	24.8 M€
<i>Alvéoles MAVL</i>	51.1 M€	18.2 M€
<i>Galeries HAO</i>	17.8 M€	1.0 M€
<i>Galeries HA1/2</i>	450.4 M€	75.4 M€
Total		204 M€

Tableau 10 - Tableau de synthèse des coûts de pièces de rechange

4.7 Synthèse des investissements

Le tableau suivant synthétise l'ensemble des investissements présentés en rappelant les coûts de MOe, de MOA et d'AMO réglementaires.

	T1	Tu	Déman- tèlement	Jouvence	Total
Total M&T	1 694 M€	5 944 M€	520 M€	1 335 M€	9 493 M€
<i>MOe de conception</i>		118.9 M€	10.4 M€	26.7 M€	156 M€
<i>MOe de réalisation</i>	186.3 M€	475.5 M€	41.6 M€	106.8 M€	810 M€
Total MOe	186 M€	594 M€	52 M€	134 M€	966 M€
<i>AMO réglementaires</i>		29.7 M€	2.6 M€	6.7 M€	39 M€
<i>MOA</i>		178.3 M€	15.6 M€	40.1 M€	234 M€
Total MOA		208 M€	18 M€	47 M€	273 M€
Total	1 880 M€	6 747 M€	590 M€	1 515 M€	10 732 M€

Tableau 11 - Tableau de synthèse des coûts d'investissement

4.8 Analyse des écarts entre Jesq05 et Japs03b

Le tableau ci-dessous présente de manière synthétique les écarts entre le chiffrage fin 2013 et le chiffrage J_{aps} 3b.

Investissements	J...05 (M€)	J...03b (M€)	Ecart (M€)	Commentaires
M&T T1	2 166	1 694	-472	Phasage de la réalisation du quartier MAVL. Optimisation du dimensionnement des revêtements. Optimisation de la ZSL. Amortissement plus faible des tunneliers (linéaire creusés moins importants)
Sous total T1	2 166	1 694	-472	
M&T Tu	4 345	5 944	+1 599	Décalage des investissements liés à la 2 ^{nde} boucle MAVL Redimensionnement de la zone HA.
Jouvence	1 408	1 335	-73	Optimisation du calcul de la jouvence..
Démantèlement/Fermeture	461	520	+59	Augmentation des linéaires du quartier HA.
Sous total Tu	6 214	7 799	1 585	
TOTAL	8 380	9 493	+1 113	

Tableau 12 - Analyse des écarts

4.9 Chronique de dépenses

La chronique de dépenses est calculée selon les hypothèses décrites dans la note « Hypothèses économiques et calendaires ». Elle est ainsi caractérisée par plusieurs périodes :

- 2021 - 2028 : investissement de la tranche 1;
- 2029 - 2043 : extension de la capacité de stockage MAVL;
- 2044 - 2078 : extension de la capacité de stockage MAVL, jouvence, fermeture progressive des alvéoles MAVL ;
- 2079 - 2099 : extension de la capacité de stockage MAVL, construction des premiers quartiers de stockage HA1/2, jouvence ;
- 2100 - 2148 : fermeture de la zone MAVL, extension de la capacité de stockage HA1/2, fermeture progressive des alvéoles HA;
- 2149 - 2156 : fermeture de la zone HA1/2, de la zone de soutien logistique puis des liaisons surface-fond.

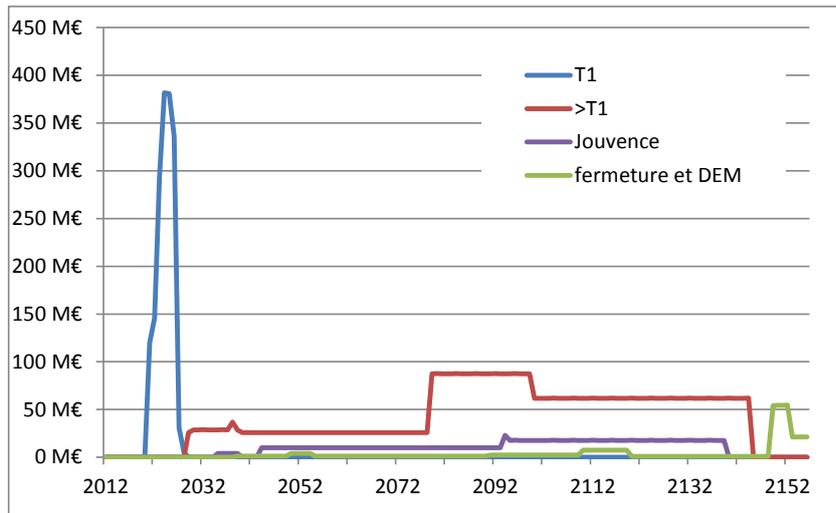


Figure 11 - Chronogramme des dépenses pour le coût de base

CHIFFRAGE CIGÉO EN PHASE ESQUISSE

Estimation du coût de base Installations transverses (SS5)

Identification

CG.TE.F.NTE.AMOA.EEE.5000.14.0064/B

Octobre 2014

Pages : **24**

SOMMAIRE

1.	Objet et périmètre	5
2.	Conception et dimensionnement des installations	5
2.1	<i>Conception Japs03b</i>	5
2.1.1	Répartition des ouvrages	5
2.1.2	Diminution des volumes de terrassements généraux	5
2.2	<i>Dimensionnement des installations</i>	6
2.2.1	Terrassements généraux et VRD	6
2.2.2	Ouvrages	7
2.2.3	Le système d'information industriel	8
2.2.4	Energies	9
2.2.5	Fluides et utilités communs	10
2.2.6	Système d'observation-surveillance	13
2.2.7	Terminal ferroviaire	13
3.	Méthodologie de chiffrage	13
3.1	<i>Hypothèses</i>	13
3.2	<i>Investissement initial</i>	13
3.3	<i>Maîtrise d'œuvre, maîtrise d'ouvrage et AMO réglementaires</i>	14
3.4	<i>Jouvence</i>	14
3.5	<i>Démantèlement</i>	14
3.6	<i>Energie et fluides pendant le démantèlement (2145-2156)</i>	15
3.7	<i>Pièces de rechange</i>	15
4.	Estimation du coût de base	15
4.1	<i>Méthodologie</i>	15
4.1.1	Terrassements généraux et VRD	16
4.1.2	Bâtiments et équipements	16
4.1.3	Electricité / Système d'information industriel	16
4.1.4	Productions d'utilités/Traitements d'effluents et réseaux	16
4.1.5	Installations de chantier	16
4.1.6	Système d'observation surveillance	17
4.1.7	Terminal ferroviaire	17
4.2	<i>Périmètre et limites de prestations</i>	17
4.3	<i>Investissement Tranche 1</i>	17
4.4	<i>Autres tranches de construction</i>	19
4.5	<i>Jouvence</i>	19
4.6	<i>Démantèlement</i>	20
4.7	<i>Energie et fluides pendant le démantèlement (2145-2156)</i>	20
4.8	<i>Pièces de rechange</i>	20
4.9	<i>Synthèse des investissements</i>	21
4.10	<i>Analyse des écarts entre Jesq05 et Japs03b</i>	21
4.10.1	Synthèse des écarts	21
4.10.2	Commentaires	21
4.11	<i>Chronique de dépenses</i>	22

TABLES DES ILLUSTRATIONS

Figures

Figure 1 - Structure des réseaux principaux et secondaires	9
Figure 2 - Principe du cycle de l'eau - zone descenderies	12
Figure 3 - Principe du cycle de l'eau - zone puits	12
Figure 4 - Schéma directeur des jouvences	14
Figure 5 - Chronogramme des dépenses pour le coût de base	23

Tableaux

Tableau 1 - Déblais/Remblais par zone	6
Tableau 2 - Surfaces de chaussées par zone	6
Tableau 3 - Linéaire de clôtures par zone	7
Tableau 4 - Ouvrages du secteur « Sécurité »	7
Tableau 5 - Ouvrages du secteur « Utilités »	8
Tableau 6 - Taux de MOe, MOA et AMO réglementaires	14
Tableau 7 - Ratios appliqués par nature de poste pour les pièces de rechange	15
Tableau 8 - Décomposition des coûts d'investissement de la tranche 1	18
Tableau 9 - Décomposition des coûts d'investissement des autres tranches de construction	19
Tableau 10 - Décomposition des coûts de jouvence	19
Tableau 11 - Décomposition des coûts de démantèlement	20
Tableau 12 - Décomposition des coûts énergie et fluides pendant le démantèlement	20
Tableau 13 - Décomposition des coûts des pièces de rechange	20
Tableau 14 - Synthèse des coûts d'investissement	21

1. Objet et périmètre

Ce document a pour objet de présenter le chiffrage du coût de base d'investissement des installations transverses et notamment :

- Le périmètre fonctionnel du sous-système (SS5) ;
- De rappeler les principes de conception et de dimensionnement ;
- De préciser les limites de prestations ;
- De décrire la méthodologie et les hypothèses de chiffrage.

Cette note s'inscrit dans le cadre du processus d'optimisation de l'esquisse aboutissant au choix d'une solution d'ensemble servant de référence pour la constitution du dossier d'APS (jalon Japs03b).

2. Conception et dimensionnement des installations

Le périmètre fonctionnel de ces installations couvre les ensembles transverses suivants :

- Terrassements généraux du site, voiries, parkings, aires de stationnement et réseaux divers ;
- Bâtiments de production des utilités et de tri des déchets conventionnels ;
- Bâtiment FLS ;
- Electricité haute tension et courants forts ;
- Courants faibles industriels, contrôle commande et systèmes d'information industriels ;
- Fluides et utilités ;
- Cycle de l'eau ;
- Terminal ferroviaire nucléaire.

De plus, le sous-système 5 apporte sa contribution aux dossiers systèmes suivants :

- Surveillance de l'environnement ;
- Protection et lutte contre l'incendie ;
- Protection physique.

2.1 Conception Japs03b

Par rapport à la conception J_{esq} 5, ont été intégrées dans le chiffrage de base 2014 :

- La réduction des volumes de terrassements engendrée par les optimisations de surfaces des bâtiments des Sous-systèmes SS2 et SS3 ;
- La voie d'opportunité n°12 (V012), « Réduction du flux des matériaux à transférer entre la descenderie et les puits & réduction des déséquilibres de terrassements généraux ».

Cette nouvelle conception, validée en termes de choix techniques par la Maîtrise d'Ouvrage (MOA) et la Maîtrise d'œuvre Système (MOe-S), constitue la solution d'ensemble système de référence à développer pour la suite de l'APS

2.1.1 Répartition des ouvrages

La pré-répartition des ouvrages réalisée au stade du J_{esq} 05 a été revue.

Un nouveau bâtiment dénommé « Bâtiment FLS » a été intégré au périmètre du SS5. Il regroupe les fonctionnalités des bâtiments :

- Salle de gestion de crise ;
- Poste central de sécurité ;
- Caserne de pompiers.

Sur la base des éléments de conception définis précédemment et du plan de masse programmatique, un schéma directeur d'aménagement « AUPE » (architecture, urbanisme, paysager, et environnement) a été proposé.

2.1.2 Diminution des volumes de terrassements généraux

La diminution des volumes de terrassements généraux est la conséquence des ajustements suivants :

- Réduction de l'emprise des bâtiments de surface, notamment l'impact sur le poste terrassement lié à la diminution de près de 50% des installations nucléaires de surface (SS2) ;
- Modification de l'altimétrie du site :
 - ✓ +15 m dans la zone du terminal ferroviaire ;
 - ✓ +12 m sur les autres zones.

Le volume des terrassements généraux a été fortement diminué, il passe ainsi :

- De 10,7 à 7,6 millions de m³ de déblais ;
- De 8,9 à 3,3 millions de m³ de remblais.

2.2 Dimensionnement des installations

Les ouvrages et équipements se répartissent sur les 2 zones du centre de stockage :

- Zone descenderies : de l'ordre de 200 hectares ;
- Zone puits : de l'ordre de 240 hectares, dont 170 hectares pour les verses et les ouvrages associés.

2.2.1 Terrassements généraux et VRD

Les travaux de terrassements généraux et VRD concernent :

- Le déboisement des surfaces ;
- La mise à niveau des plateformes pour implanter les ouvrages de surface ;
- Les terrassements liés aux ouvrages spécifiques ;
- La réalisation des ouvrages de génie civil pour implanter les réseaux enterrés entre les bâtiments ;
- La réalisation des voiries structurantes desservant les différents secteurs ;
- La mise en place de l'éclairage extérieur et des clôtures définitives.

Les surfaces de déboisement ont été estimées à 10% de la superficie de la zone descenderies et à 90% de la superficie de la zone puits. Les volumes des terrassements généraux ont été estimés sur la base de modélisations 3D et répertoriés dans le tableau suivant¹.

	Décapage terre végétale	Déblais	Remblais
Infrastructure zone descenderies	354 000 m ³	3 476 000 m ³	2 525 000 m ³ (hors merlonnage SS2)
Infrastructure zone puits	210 000 m ³	753 000 m ³	715 000 m ³
Verses	508 000 m ³	3 430 000 m ³	110 000 m ³

Tableau 1 - Déblais/Remblais par zone

Les voiries concernent les principales voies de circulation au sein de Cigéo (voiries structurantes du projet Cigéo). Les quantités de déblais et remblais associées sont comptabilisées dans les terrassements. Le tableau suivant récapitule les surfaces de chaussées sans distinction des voiries neuves ou des réfections / renforcement de chaussées.

	Voiries
Zone descenderies	75 000 m ²
Zone puits	151 000 m ²

Tableau 2 - Surfaces de chaussées par zone

Des galeries de distribution des fluides (génie civil) sont réalisées pour une linéaire estimé à 3 km en zone descenderies et 3 km en zone puits. A ce stade, l'éclairage extérieur couvre, à dire d'experts, 70% de la zone puits et 30% de la zone descenderies.

Le linéaire des clôtures est établi sur la base du plan masse et récapitulé dans le tableau suivant.

¹ Les volumes synthétisés dans ce tableau sont arrondis. Les données prises en compte dans le chiffrage proviennent directement des modélisations 3D et sont plus détaillées.

	Clôture sécurisée	Clôture lourde
Zone descenderies	2 300 ml	2 500 ml
Zone puits	8 200 ml	6 300 ml

Tableau 3 - Linéaire de clôtures par zone

2.2.2 Ouvrages

Les hypothèses de dimensionnement des surfaces sont présentées dans l'analyse programmatique livrée au jalon J_{esd} 05. Les tableaux suivants détaillent, par secteur et par zone après optimisation de la redondance et des surfaces des bâtiments, l'ensemble des ouvrages identifiés en début d'APS.

Secteur sécurité

N° Ouvrage	Ouvrages	Surfaces de plancher	Type d'ouvrage	Observations
Zone descenderies				
035	Bâtiment FLS	4100 m ²	Tertiaire béton R+2	
128	Salle de gestion de crise	inclus		Inclus dans 035
092	Poste central de sécurité	inclus		Inclus dans 035
043	Caserne de pompiers	inclus		Inclus dans 035

Tableau 4 - Ouvrages du secteur « Sécurité »

Secteur utilités

N° Ouvrage	Ouvrages	Surfaces de plancher	Type d'ouvrage	Observations
Zone descenderies				
028	Bâtiment de production des utilités	1 200 m ²	Locaux techniques	
031	Bâtiment de tri des déchets conventionnels	7 000 m ²	Aire bétonnée clôturée	
090	Plateforme fluides et utilités	300 m ²	Aire bétonnée	
102	Poste de livraison électrique (90 kV)		Locaux techniques	Estimation RTE
104	Poste de transformation (90 à 20 kV)	840 m ²	Aire bétonnée	
106	Groupe électrogène / Poste distribution secours	800 m ²	Locaux techniques	
131	Station-service FOD	200 m ²	Station-service	Estimé
133	Station-service essence / gasoil	200 m ²	Station-service	Estimé
135	STEP station d'épuration	3 000 m ²	Cf. 0	Estimé
154	Réservoir eau potable	500 m ²	Cf. 0	Estimé
156	Réservoir eau recyclée	500 m ²	Cf. 0	Estimé
172	Pomperie eau recyclée	50 m ²		
173	Pomperie eau recyclée	50 m ²		
188	Poste de distribution 20 kV	500 m ²	Locaux techniques	
Zone puits				
029	Bâtiment de production des utilités	1 200 m ²	Locaux techniques	
032	Bâtiment de tri des déchets conventionnels	805 m ²	Aire bétonnée clôturée	
091	Plateforme fluides et utilités	600 m ²	Aire bétonnée	
103	Poste de livraison électrique (90 kV)		Locaux techniques	Estimation RTE
105	Poste de transformation (90 à 20 kV)	840 m ²	Aire bétonnée	

N° Ouvrage	Ouvrages	Surfaces de plancher	Type d'ouvrage	Observations
107	Groupe électrogène / Poste distribution secours	600 m ²	Locaux techniques	
132	Station-service FOD	200 m ²	Station-service	Estimé
134	Station-service essence / gasoil	200 m ²	Station-service	Estimé
136	STEP station d'épuration	3 000 m ²	Voir § ci-après	Estimé
155	Réservoir eau potable	500 m ²	Voir § ci-après	Estimé
157	Réservoir eau recyclée	500 m ²	Voir § ci-après	Estimé
174	Pomperie eau recyclée	50 m ²		
175	Pomperie eau recyclée	50m ²		
189	Poste de distribution 20 kV	500 m ²	Locaux techniques	

Tableau 5 - Ouvrages du secteur « Utilités »

2.2.3 Le système d'information industriel

Le système d'information industriel (SII) de Cigéo est composé :

- Des moyens communs à la plateforme d'exploitation et à la plateforme d'essais.
 - ✓ Ces moyens permettent :
 - Le fonctionnement et la gestion du SII ;
 - Le stockage et l'archivage des données.
 - ✓ Ils sont composés d'équipements informatiques standards avec une structure redondante ;
 - ✓ Ils sont implantés et dans deux salles informatiques indépendantes.
- D'une structure opérationnelle, dite plateforme d'exploitation :
 - ✓ Moyens de conduite et de supervision des installations ;
 - ✓ Implantés dans les différents locaux dédiés : salle de conduite centralisée (ouvrage 126), salles ou postes de conduite locaux, poste central de sécurité du site, locaux du service de protection contre les rayonnements ionisants...
 - ✓ Elle comprend une salle de repli, distincte de la salle de conduite centralisée, qui permet en cas d'incident ou d'accident la mise à l'état sûr et le maintien à l'état sûr des installations.
 - ✓ Les moyens de conduite et de supervision concernent les systèmes suivants :
 - Contrôle commande ;
 - Protection physique ;
 - Système de sécurité du personnel ;
 - Voix données images ;
 - Gestion technique bâtiment ;
 - Gestion technique centralisée ;
 - Gestion technique électrique ;
 - Radioprotection (couche supérieure) ;
 - Système de sécurité incendie ;
 - Ventilation nucléaire ;
 - Observation surveillance de l'environnement et des installations.
- D'une structure indépendante de l'exploitation, dite plateforme de développement/essais et de formation des opérateurs :
 - ✓ Moyens et fonctions nécessaires, après la mise en exploitation du centre, aux activités de développement, de tests, d'intégration et de formation ;
 - ✓ Elle permet de tester et de qualifier les extensions graduelles (matériel, application, etc...) avant déploiement en plateforme d'exploitation.
- Des réseaux de communication dont l'infrastructure couvre l'ensemble du site au travers :
 - ✓ D'une structure de réseaux principaux et secondaires filaires ;
 - ✓ De réseaux sans fil.

Un réseau indépendant du réseau d'exploitation supporte les activités de développements et essais pour les opérations de déploiement graduel et de jouvence.

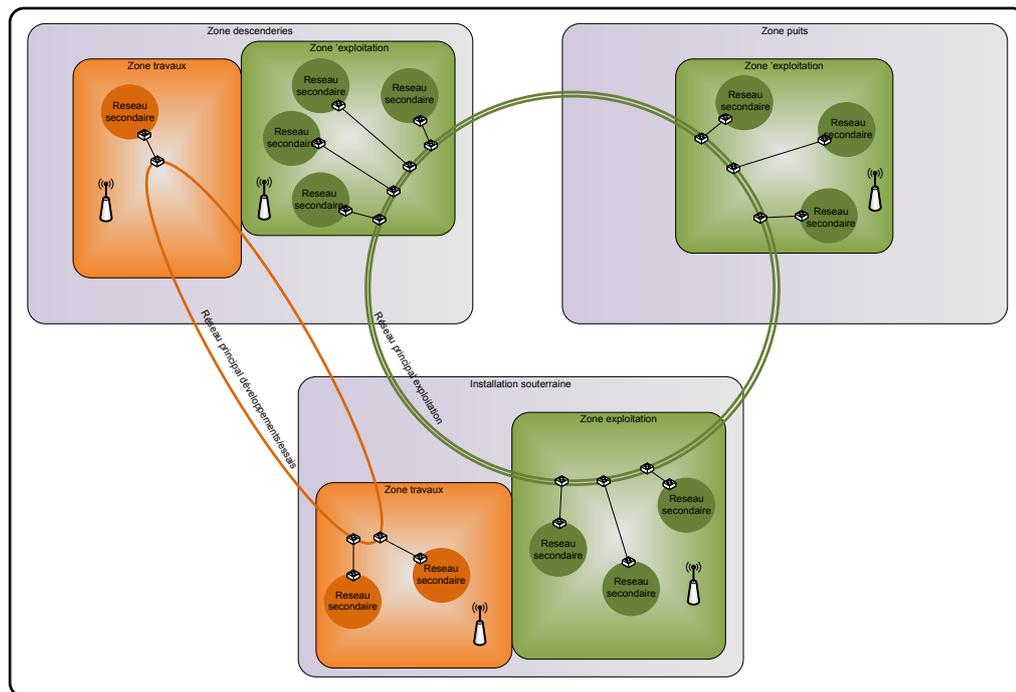


Figure 1 - Structure des réseaux principaux et secondaires

L'architecture des réseaux principaux se décompose en 2 types :

- Réseau filaire (support fibre optique) en topologie anneaux sécurisés et redondants, avec une couverture globale surface et souterrain ;
- Réseaux sans fil (technologies adaptées aux différents milieux : ouverts, en bâtiment et en souterrain) qui couvrent les besoins de communications spécifiques aux dispositifs et équipements en mobilité : téléphonie mobile, dispositifs de sécurité des rondiers, vidéo-contrôle du processus nucléaire, géolocalisation, contrôle-commande.

Les réseaux secondaires sont dédiés aux différents sous-systèmes et sont donc comptabilisés dans chacun d'entre eux. Les principaux rôles des réseaux secondaires sont:

- De prendre en charge les échanges locaux entre les différents équipements sans surcharger le réseau principal ;
- De gérer les modes dégradés (perte du niveau supérieur, disponibilité, indépendance...);
- Ils sont connectés aux réseaux principaux aux points de regroupement situés en zones descenderies, puits et installation souterraine.

2.2.4 Energies

Des bilans de consommation des différentes formes d'énergie nécessaires au centre de stockage ont été établis pendant les études d'esquisse, permettant de dimensionner les réseaux et équipements associés à mettre en œuvre :

- Alimentation du site et distribution électrique ;
- Alimentation en gaz naturel pour la production d'eau chaude chauffage ;
- Alimentation en fuel-oil domestique (FOD) pour la production d'eau chaude chauffage.

Electricité

L'alimentation électrique est prévue en 90 kV à partir d'un poste de livraison RTE sur chacune des deux zones (descenderies et puits).

La distribution HTA est assurée à partir d'un poste de transformation 90/20 kV sur chacune des deux zones.

Une liaison en 90 kV RTE relie les 2 postes de livraison 90 kV afin de garantir la disponibilité de l'alimentation électrique (principe de redondance, garantissant la continuité de service en matière de fourniture électrique : 99,8%). Les lignes 90 kV sont enterrées.

Les bilans de puissance ont permis de définir les puissances maximales nécessaires par zone, de l'ordre de 64 MVA pour la zone descenderies et 32 MVA pour la zone puits.

Le dimensionnement des groupes électrogènes de secours est réalisé sur la base d'une liste préliminaire des récepteurs à secourir (vitaux, essentiels et prioritaires).

A ce stade de l'étude seuls les principaux équipements sont identifiés :

- 7 Transformateurs 90/20 kV - 4 en ZD / 3 en ZP ;
- 85 Tableaux 20 kV - 49 en ZP / 36 en ZD ;
- 60 Cellule d'arrivée coupure d'artère 20 kV - 36 en ZP / 24 en ZD ;
- 10 Transformateurs élévateurs - 4 en ZP / 6 en ZD ;
- 16 Groupes électrogènes - 4 en ZP / 10 en ZD.

Le choix des équipements est basé sur un choix de composants standards.

Les boucles de distribution en 20 kV ont des longueurs de l'ordre de 206 km en zone descenderies (redondance) et 20 km en zone puits, avec des câbles de section 185 mm² en moyenne.

Gaz naturel

Le bilan de consommation en gaz naturel est établi à partir des équipements de production de l'eau chaude chauffage. Les équipements de stockage de gaz naturel associés sont compris dans les équipements liés à la production d'eau chaude chauffage.

Hydrocarbures

Les consommations potentielles en hydrocarbures concernent :

- Les essais des groupes électrogènes ;
- Le fonctionnement des compresseurs d'air comprimé à moteur thermique ;
- Les essais des suppresseurs incendies à moteur thermique ;
- Les essais des brûleurs mixtes des chaudières ;
- L'alimentation des véhicules d'exploitation.

A ce stade du projet, il est prévu sur chaque zone une station-service FOD (ouvrages 131 et 132) et une station-service essence / gasoil (ouvrages 133 et 134).

2.2.5 Fluides et utilités communs

Des bilans de consommation des fluides et utilités ont été établis pendant les études d'esquisse, permettant de dimensionner les réseaux et équipements à mettre en œuvre :

- L'eau chaude pour le chauffage et eau glacée ;
- L'eau chaude sanitaire ;
- Le stockage de gaz industriels et médicaux et production d'air comprimé décentralisés.

Sur chacune des zones puits et descenderies, un bâtiment dédié abrite les équipements de production des fluides et utilités communs (bâtiments 28 et 29 associés aux plateformes 90 et 91).

Eau chaude de chauffage et eau glacée

Sur chacune des zones puits et descenderies, la production est centralisée, puis distribuée par une boucle bitube jusqu'aux sous-stations des bâtiments conventionnels et nucléaires.

Le dimensionnement des équipements de production et de distribution est fondé sur le bilan des besoins pour le chauffage ou la climatisation ainsi que pour le traitement de l'air. Ce dimensionnement intègre la redondance, la production d'eau chaude sanitaire n'est pas comprise.

- Pour l'eau chaude de chauffage, la puissance installée est de 12,8 MW par zone ;
- Pour l'eau glacée, la puissance installée est de 8,4 MW en zone descenderie et 10 MW en zone puits.

La production d'eau chaude de chauffage est réalisée à partir de chaufferies centralisées intégrant des chaudières équipées de brûleurs mixtes FOD/Gaz. (4 chaudières sur chaque zone).

La production d'eau glacée est réalisée à partir de machines frigorifiques électriques. (4 groupes de production d'EG par zone).

La boucle de distribution comprend 2 tuyaux d'amenée d'eau chaude de chauffage ou d'eau glacée et 2 tuyaux de retour d'eau froide. Ces boucles ont des longueurs de 2,5 km en zone puits et 4,3 km en zone descendrière auxquelles il faut ajouter les raccordements pour un linéaire cumulé de l'ordre de 36 km de tuyauterie en DN200.

Eau chaude sanitaire

A l'issue de l'esquisse, la production d'eau chaude sanitaire (ECS) est considérée décentralisée sur les différentes installations. Elle sera réalisée à partir de panneaux solaires (20 systèmes de captation par zone).

Dans le cadre du présent chiffrage, les équipements de production sont comptabilisés dans le sous-système 5 ; ils seront répartis dans les différents sous-systèmes (hors périmètre fluides et utilités communs) en phase d'avant-projet.

Gaz industriels et médicaux

Les besoins en gaz industriels et médicaux en exploitation sont définis par chaque sous-système. Les zones de stockage sont situées à proximité des bâtiments consommateurs (stockage décentralisé).

Cycle de l'eau

Le cycle de l'eau comprend l'alimentation en eau potable ainsi que la gestion des effluents liquides.

Chacune des zones descendrières et puits est alimentée en eau potable. Les besoins en eau ont été estimés de l'ordre de :

- 500 m³/jour lors de la phase chantier initiale (principalement pour la fabrication du béton) ;
- 100 m³/jour en exploitation.

L'installation est constituée de 2 groupes de surpression (1 par zone) et 4 ballons de stockage (1 en ZD / 3 en ZP).

L'utilisation d'eau recyclée pour les travaux est prévue dès la mise en place des bassins de rétention des eaux pluviales.

En ce qui concerne les effluents, les zones seront équipées d'installations de traitement afin de ne rejeter que des eaux traitées et contrôlées. Les différents types d'effluents liquides à gérer sont :

- Les eaux vannes et les eaux usées ;
- Les eaux pluviales ;
- Les eaux d'extinction d'incendie ;
- Les eaux de lavage ;
- Les eaux d'exhaure ;
- Les eaux de ruissellement de versées ;
- Les eaux de ruissellement de voiries et parkings ;
- Les eaux industrielles.

Chaque type d'effluent est collecté individuellement et analysé (paramètres physico-chimiques, bactériologiques et radiologiques). Il est ensuite traité (paramètres physico-chimiques et bactériologiques) avant d'être restitué dans le milieu naturel ou recyclé sur site en tant qu'utilitaire (eaux de lavage, eaux incendie...). Le principe établi lors des études d'esquisse est une réutilisation maximale des effluents afin de limiter les rejets dans le milieu naturel. Ils seront traités au travers de 2 stations d'épurations (1 par zone).

Concernant les effluents dont l'analyse révélerait une contamination radiologique, ils sont confinés sur le site en zone nucléaire et envoyés vers un centre de traitement spécifique.

Des bassins d'orage (dont les terrassements sont comptabilisés au 2.2.1) sont prévus pour absorber tout épisode d'occurrence décennale et centennale ; des bassins de pollution sont prévus afin de confiner toute pollution accidentelle sur le site.

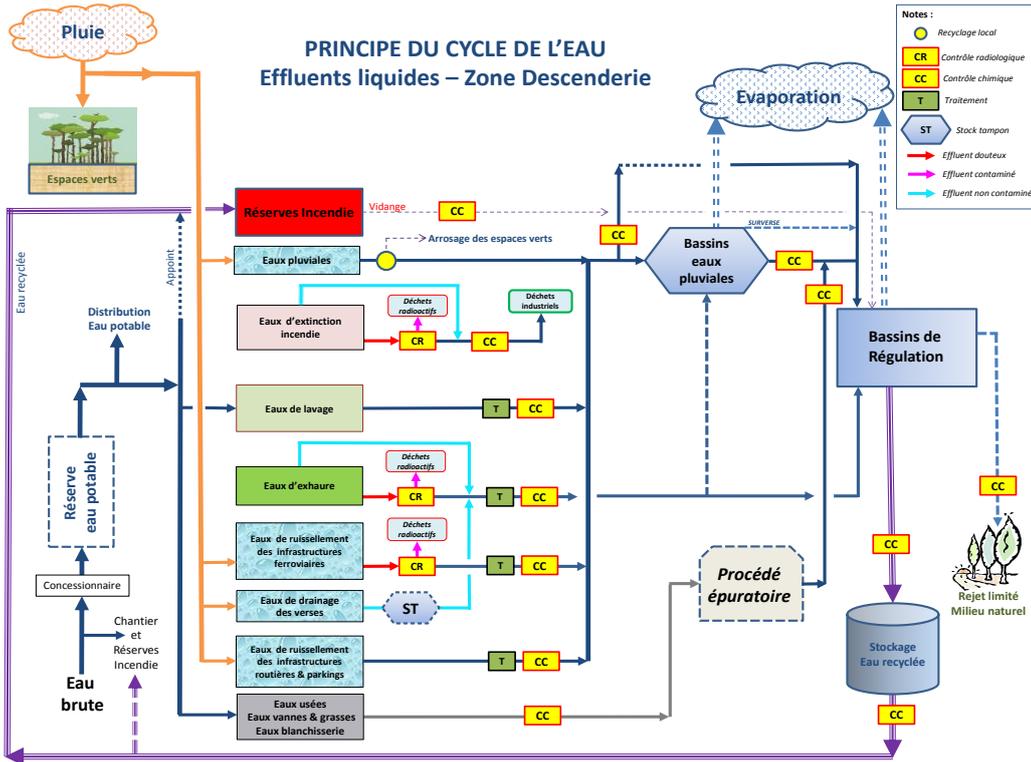


Figure 2 - Principe du cycle de l'eau - zone descenderies

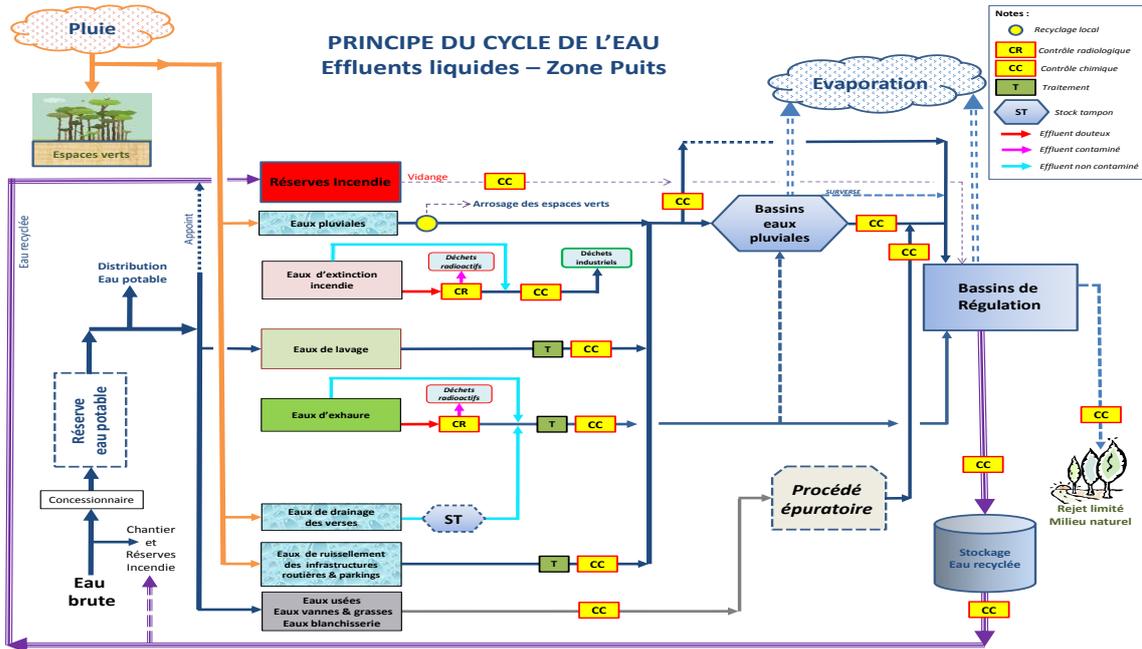


Figure 3 - Principe du cycle de l'eau - zone puits

Les quantités de déblais et remblais associées sont comptabilisées dans les terrassements. Au stade de l'esquisse, les surfaces de bassin envisagées sont de 5 500 m² en zone descenderies et 17 500 m² en zone puits.

Les ouvrages spécifiques au réseau incendie sont :

- Les réservoirs d'eau incendie (ouvrages 121 et 123) ;
- Les locaux pomperies (76 et 77), les pomperies (ouvrages 172, 173, 174 et 175) ;
- Les réseaux de distribution incendie (réseau fonte GS enterré DN300 de 20 km sur chaque zone).

Gestion des déchets conventionnels

Les déchets conventionnels font l'objet d'un tri sur site (ouvrages 31 et 32) avant d'être pris en charge par un service d'évacuation des déchets (type syndicat ou concessionnaire).

2.2.6 Système d'observation-surveillance

En complément de la surveillance réglementaire INB (contrôle-commande), Cigéo doit faire l'objet d'un programme d'observation-surveillance qui a pour objectif de suivre l'évolution de l'état des composants de l'installation de stockage et du milieu géologique, ainsi que les principaux phénomènes responsables de cette évolution (cf. guide de sûreté ASN relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde). Le programme d'observation-surveillance basé sur l'actualisation des connaissances scientifiques doit permettre de montrer que les phénomènes précités ont bien été anticipés et restent maîtrisés.

Le système d'observation-surveillance est composé d'instrumentation in-situ et d'un réseau de centralisation de l'information. Une densité d'instrumentation soutenue est prévue à la mise en service de l'installation, considérant que les besoins de connaissances et de vérification seront plus forts au démarrage de l'exploitation. Par la suite, au sein de séries d'ouvrages identiques, une diminution progressive de la densité d'instrumentation à demeure est anticipée au fur et à mesure de l'acquisition de données et de résultats au cours de l'exploitation du stockage, dans le cas où des confirmations et des démonstrations sont obtenues et qu'aucune évolution de conception ne serait intervenue.

2.2.7 Terminal ferroviaire

L'option d'une implantation du terminal ferroviaire dans le périmètre de Cigéo pour la réception des colis de déchets est étudiée. Ce terminal est positionné sur la zone descenderies.

3. Méthodologie de chiffrage

3.1 Hypothèses

Le chiffrage est présenté aux conditions économiques de janvier 2012 et tous les coûts sont présentés hors taxe.

3.2 Investissement initial

Les coûts unitaires sont issus des bases de coûts de la MOe-S qui consolident l'ensemble des projets menés par les entreprises du groupement.



Usine d'assemblage de l'A380

Maîtrise d'œuvre

Technip a notamment pris en charge la maîtrise d'œuvre générale, la conception générale du site et la maîtrise d'œuvre technique pour 80% de l'usine.



Projet EOLE - Bâtiment technique et de bureaux

Maîtrise d'œuvre

Ingérop a réalisé la maîtrise d'œuvre, le space planning et l'AMO pour les énergies.

Tout au long de la phase esquisse, le chiffrage de la MOe-S a fait l'objet de plusieurs niveaux d'évaluation :

- Contrôle par la cellule d'estimation de l'Andra ;
- Audit des méthodes et des outils par la société PwC ;
- Benchmark par rapport à d'autres références dans le cadre de la revue des coûts unitaires d'investissement sur la base de J_{esq} 04.

3.3 Maîtrise d'œuvre, maîtrise d'ouvrage et AMO réglementaires

Les hypothèses de chiffrage sont présentées dans la note « Estimation du coût de base de maîtrise d'œuvre et de maîtrise d'ouvrage », le tableau suivant présente les taux retenus.

Tranches	Types	Ratios
T1	MOe de conception	Intégrées au PMT et présentées dans la note MOe/MOA
	MOA	
	AMO réglementaires	
	MOe de réalisation	6%
Tu	MOe de conception	2%
	MOA	3%
	AMO réglementaires	0.5%
	MOe de réalisation (y/c jouvence et démantèlement)	6%

Tableau 6 - Taux de MOe, MOA et AMO réglementaires

3.4 Jouvence

Le schéma directeur de jouvence a fait l'objet d'une optimisation afin de limiter le renouvellement des ouvrages. Cette optimisation conduit notamment à retenir des durées de vie optimistes pour les bâtiments et certains équipements par rapport aux REX et pratiques usuelles.

Ainsi, les bâtiments conventionnels construits en tranche 1 sont reconstruits à neuf après 60 ans d'exploitation. Pendant la durée de vie de 60 ans du génie civil du bâtiment, le second œuvre (façades, couverture...) est jouvencé (« ravalement ») une fois à mi vie (30 ans), tandis que les lots techniques avec une durée de vie prévisionnelle de 20 ans (contrôle d'accès, distribution informatique, éclairage...) font l'objet de 2 jouvences, ainsi qu'illustré ci-après.

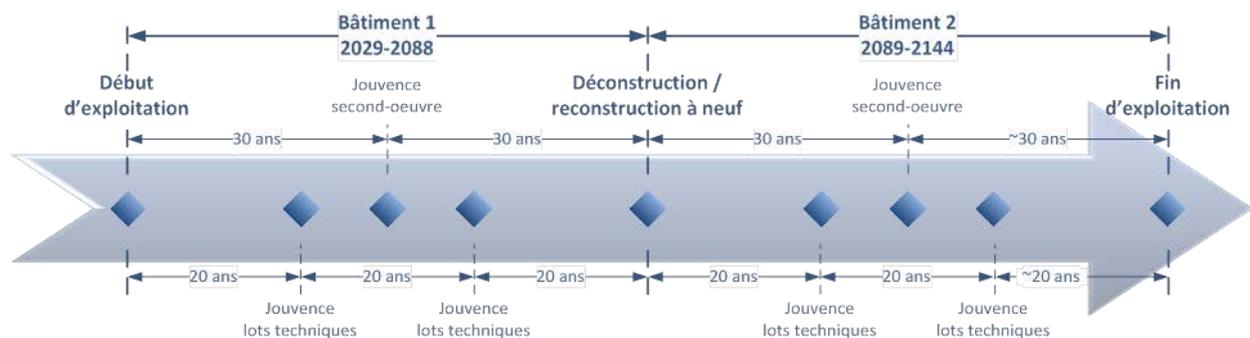


Figure 4 - Schéma directeur des jouvences

3.5 Démantèlement

Les coûts de démantèlement sont estimés à 5% des coûts de construction selon des REX fournis par les producteurs. Les coûts des capteurs du système d'observation surveillance sont exclus de l'assiette d'investissement sur laquelle s'applique ce ratio.

3.6 Energie et fluides pendant le démantèlement (2145-2156)

Ce poste comprend la fourniture des utilités (électricité et fluides) nécessaires au maintien des installations pendant la période de démantèlement. Il ne couvre pas les besoins liés aux travaux et à l'exploitation qui sont comptabilisés respectivement dans les notes d'investissement et d'exploitation.

Comme indiqué dans la note dédiée à l'exploitation, la consommation électrique a fait l'objet d'une évaluation préliminaire par Gaiya, le tarif d'achat de l'électricité est pris en référence à 0,0571 €/kWh, en cohérence avec le raccordement du site en 400 kV et sans prendre en compte les modifications tarifaires annoncées par l'Etat en 2013. La fourniture du gaz et des différents fluides est pris en compte à ce stade des études à hauteur de 5% du coût de fourniture de l'électricité.

Ce poste correspond à de la consommation d'énergies et n'entre pas en ligne de compte dans le calcul de la MOA de la MOe et des AMO réglementaires du poste « démantèlement ».

3.7 Pièces de rechange

A ce stade des études, le montant annuel des pièces de rechange est estimé sur la base de ratios par nature de poste. Le tableau suivant présente les ratios appliqués.

Nature de poste	Ratio
Mécanique	0.50%
Electricité / Conduite / Ventilation / Tuyauterie / Second œuvre	0.25%
Autres corps de métier	0.00%

Tableau 7 – Ratios appliqués par nature de poste pour les pièces de rechange

4. Estimation du coût de base

4.1 Méthodologie

Les coûts estimés des installations transverses couvrent pour l'ensemble des tranches les fournitures et prestations suivantes :

- Pour le bâtiment FLS :
 - ✓ L'ensemble des approvisionnements et travaux tous corps d'états.
- Pour les bâtiments conventionnels :
 - ✓ Les productions d'utilités (chaufferie, production d'eau glacée,....) ;
 - ✓ Les postes de livraison et de distribution électrique HT ;
 - ✓ La production électrique de secours commune ;
 - ✓ Les réseaux de mise à la terre.
- Pour l'ensemble du site :
 - ✓ Les terrassements généraux ;
 - ✓ Les VRD ;
 - ✓ Les clôtures ;
 - ✓ La distribution HTA en aval des postes de distribution 20 kV y.c les sous-stations électriques HTA/HTA et HTA/BT, ainsi que les centrales de secours HTA ;
 - ✓ Les productions, stockages et distribution d'utilités (eau chaude, vapeur,) ;
 - ✓ Le réseau incendie ;
 - ✓ Le traitement des eaux et des déchets conventionnels ;
 - ✓ Les arrivées, stockage et distribution des énergies (hydrocarbures, gaz, ...) ;
 - ✓ Les réseaux principaux de mise à la terre ;
 - ✓ Les niveaux supérieurs CFI-C ;
 - ✓ Le système d'information industrielle ;
 - ✓ Le système d'observation surveillance de l'environnement ;
 - ✓ Les installations de chantier.

Ces investissements sont répartis en fonction du phasage des travaux :

- Investissement tranche 1 : préparation du site, construction des ouvrages et des équipements du périmètre de la tranche 1
- Autres tranches de construction : constructions neuves qui viennent en addition des ouvrages de la tranche 1 (ex : extension des verses, remplacement en fin de vie des bâtiments du Laboratoire souterrain mutualisés avec Cigéo)
- Démantèlement : déconstruction des ouvrages
- Jouvence : renouvellement à l'identique des ouvrages et équipements, en substitution des ouvrages et équipements à l'issue de leur durée de vie

4.1.1 Terrassements généraux et VRD

Le poste a été estimé sur la base :

- Des quantitatifs préliminaires (déboisement, décapage, déblais, remblais, bassins, voiries, parkings) ;
- De prix unitaires moyens issus des bases de données de la MOe-S.

4.1.2 Bâtiments et équipements

Bâtiments conventionnels

Les bâtiments conventionnels sont estimés sur la base :

- D'une surface de plancher (m²) ;
- De prix unitaires en €/m² différenciés en fonction de la typologie de bâtiment (ouvrage béton R+2, locaux techniques, zone bétonnée, ...). Ces prix moyens composites couvrent les fournitures et travaux pour l'ensemble des corps d'états (génie civil gros-œuvre & second-œuvre, tuyauterie, électricité, contrôle commande, ...)

Equipements

Les équipements propres aux installations conventionnelles ont été évalués sur la base :

- D'une liste préliminaire d'équipements ;
- De prix unitaires issus des bases de données de la MOe-S.

4.1.3 Electricité / Système d'information industriel

Le chiffrage de ces postes résulte :

- De la détermination des principaux quantitatifs et de leurs caractéristiques associées basés sur une étude préliminaire des spécialistes de la MOe-S ;
- De l'application de prix unitaires et ratios issus des bases de données de la MOe-S.

4.1.4 Productions d'utilités/Traitements d'effluents et réseaux

L'estimation découle de la démarche suivante :

- Recensement des principaux équipements et ouvrages avec identification des caractéristiques techniques associées ;
- Détermination de longueurs moyennes et diamètres de réseaux par type de fluides sur les bases d'études préliminaires Gaiya ;
- Application de prix unitaires issus du retour d'expérience et des bases de données de la MOe-S.

4.1.5 Installations de chantier

Ce poste couvre 3 types de dépenses différentes :

- Les aménagements provisoires de chantier (bureaux, magasins,) provisionnés sur la base de surfaces prévisionnelles et de prix unitaires moyens ;
- Les consommations d'électricité en phase construction valorisées sur la base d'un bilan prévisionnel de consommation ;
- Les formations de personnel aux procédures Cigéo.

4.1.6 Système d'observation surveillance

Le chiffrage initial prenait en compte une installation dimensionnée pour la gestion centralisée de 80 000 capteurs. Cette estimation a été optimisée par l'Andra et redimensionnée à 40 000 capteurs.

4.1.7 Terminal ferroviaire

Le coût est issu d'une estimation Areva TNI de 2009, sur une conception différente, mise aux conditions économiques de janvier 2012 avec l'indice TPO1. Cette estimation fournit une évaluation grossière du coût d'un terminal ferroviaire qui sera revue en phase d'avant-projet sur la base de la conception et de l'implantation développées.

4.2 Périmètre et limites de prestations

Sont inclus dans cette estimation

- Les coûts des travaux de l'ensemble des tranches de construction ;
- Le démantèlement : déconstruction des ouvrages ;
- La jouvence des installations : renouvellement à l'identique des ouvrages et équipements, en substitution des ouvrages et équipements à l'issue de leur durée de vie.

Les coûts présentés comprennent :

- Les études fournisseurs ;
- Les fournitures et approvisionnements ;
- La préfabrication ;
- L'emballage et le transport sur site ;
- Le montage (en usine et sur site) ;
- Les essais (en usine et sur site) ;
- Les premières dotations de pièces de rechange.

Sont exclus de cette estimation

- Les coûts de la maîtrise d'œuvre de conception en tranche 1 ;
- Les coûts de la maîtrise d'ouvrage en tranche 1 ;
- les aléas de réalisation ;
- les assurances, les impôts et taxes.

4.3 Investissement Tranche 1

Le coût d'investissement comprend :

- Les terrassements généraux et VRD ;
- La plateforme de stockage des verses ;
- Les bâtiments conventionnels de surface de SS5 ;
- Le système d'information industriel ;
- Les équipements de production et distribution des énergies ;
- Les équipements de production et distribution des fluides et utilités ;
- Le système d'observation surveillance ;
- Les installations provisoires de chantier ;
- Le terminal ferroviaire.

Le tableau ci-dessous synthétise la décomposition des coûts d'investissement de la tranche 1 aux conditions économiques de 2012.

	Total	Zone puits	Zone descenderies	Communs et transverses
<i>Terrassements généraux</i>	126 M€	88.4 M€	37.5 M€	
<i>VRD</i>	123 M€	44.1 M€	79.3 M€	
<i>Bâtiments</i>	32 M€	11.4 M€	20.8 M€	
<i>Système d'info. industriel</i>	60 M€	9.0 M€	50.5 M€	
<i>Energies</i>	97 M€	15.0 M€	82.3 M€	
<i>Fluides et utilités</i>	46 M€	23.5 M€	22.8 M€	
<i>Installations de chantier</i>	28 M€			27.7 M€
<i>Observation surveillance</i>	19 M€			19.1 M€
<i>Terminal ferroviaire</i>	23 M€		22.5 M€	
Total M&T	554 M€	191 M€	316 M€	47 M€
<i>MOe de conception</i>		cf. note MOe/MOA		
<i>MOe de réalisation</i>	33.2 M€			
Total MOe	33 M€			
<i>AMO réglementaires</i>		cf. note MOe/MOA		
<i>MOA</i>		cf. note MOe/MOA		
Total MOA				
Total	587 M€			

Tableau 8 - Décomposition des coûts d'investissement de la tranche 1

4.4 Autres tranches de construction

Ce poste concerne l'observation-surveillance en lien avec l'extension de l'architecture souterraine ainsi que les frais de chantier (hors travaux souterrains) associés.

Le tableau ci-dessous synthétise la décomposition des coûts d'investissement des tranches ultérieures aux conditions économiques de 2012.

	Total	Zone puits	Zone descenderies	Communs et transverses
<i>Terrassements généraux</i>	0 M€	0.0 M€	0.0 M€	
<i>VRD</i>	0 M€	0.0 M€	0.0 M€	
<i>Bâtiments</i>	0 M€	0.0 M€	0.0 M€	
<i>Système d'info. industriel</i>	0 M€	0.0 M€	0.0 M€	
<i>Energies</i>	0 M€	0.0 M€	0.0 M€	
<i>Fluides et utilités</i>	0 M€	0.0 M€	0.0 M€	
<i>Installations de chantier</i>	140 M€			139.6 M€
<i>Observation surveillance</i>	94 M€			94.4 M€
<i>Terminal ferroviaire</i>	0 M€		0.0 M€	
Total M&T	234 M€	0 M€	0 M€	234 M€
<i>MOe de conception</i>	4.7 M€			
<i>MOe de réalisation</i>	14.0 M€			
Total MOe	19 M€			
<i>AMO réglementaires</i>	1.2 M€			
<i>MOA</i>	7.0 M€			
Total MOA	8 M€			
Total	261 M€			

Tableau 9 - Décomposition des coûts d'investissement des autres tranches de construction

4.5 Jouvence

Les tableaux ci-dessous synthétisent la décomposition des coûts de jouvence des bâtiments aux conditions économiques de 2012.

	Total	Zone puits	Zone descenderies	Communs et transverses
<i>Terrassements généraux</i>	0 M€	0.0 M€	0.0 M€	
<i>VRD</i>	218 M€	99.9 M€	118.2 M€	
<i>Bâtiments</i>	69 M€	22.2 M€	46.5 M€	
<i>Système d'info. industriel</i>	313 M€	47.5 M€	265.5 M€	
<i>Energies</i>	261 M€	48.1 M€	213.3 M€	
<i>Fluides et utilités</i>	133 M€	69.2 M€	63.6 M€	
<i>Installations de chantier</i>	17 M€			16.8 M€
<i>Observation surveillance</i>	103 M€			103.5 M€
<i>Terminal ferroviaire</i>	24 M€		23.6 M€	
Total M&T	1 138 M€	287 M€	731 M€	120 M€
<i>MOe de conception</i>	22.8 M€			
<i>MOe de réalisation</i>	68.3 M€			
Total MOe	91 M€			
<i>AMO réglementaires</i>	5.7 M€			
<i>MOA</i>	34.1 M€			
Total MOA	40 M€			
Total	1 269 M€			

Tableau 10 - Décomposition des coûts de jouvence

4.6 Démantèlement

Les coûts de démantèlement sont estimés à 5% des coûts de construction selon des REX fournis par les producteurs. Les coûts de l'observation- surveillance, ainsi que l'énergie nécessaire aux travaux sont exclus de l'assiette d'investissement sur laquelle s'applique ce ratio.

Le tableau ci-dessous synthétise la décomposition des coûts de démantèlement des bâtiments aux conditions économiques de 2012.

	Total	Zone puits	Zone descenderies	Communs et transverses
<i>Terrassements généraux</i>	6 M€	4.4 M€	1.9 M€	
<i>VRD</i>	7 M€	2.2 M€	5.2 M€	
<i>Bâtiments</i>	2 M€	0.6 M€	1.0 M€	
<i>Système d'info. industriel</i>	3 M€	0.4 M€	2.5 M€	
<i>Energies</i>	5 M€	0.7 M€	4.1 M€	
<i>Fluides et utilités</i>	2 M€	1.2 M€	1.1 M€	
<i>Installations de chantier</i>	6 M€			5.7 M€
<i>Observation surveillance</i>	0 M€			0.0 M€
<i>Terminal ferroviaire</i>	1 M€		1.1 M€	
Total M&T	32 M€	10 M€	17 M€	6 M€
<i>MOe de conception</i>	0.6 M€			
<i>MOe de réalisation</i>	1.9 M€			
Total MOe	3 M€			
<i>AMO réglementaires</i>	0.2 M€			
<i>MOA</i>	1.0 M€			
Total MOA	1 M€			
Total	36 M€			

Tableau 11 - Décomposition des coûts de démantèlement

4.7 Energie et fluides pendant le démantèlement (2145-2156)

Le tableau ci-dessous synthétise la décomposition des coûts de l'énergie et fluides nécessaires au maintien des installations pendant la période de démantèlement. Ils sont fournis aux conditions économiques de 2012.

	Conso. électrique (MWh)	Conso. électricité (M€)	Conso. Gaz (M€)	Total conso. (M€)
<i>SS2</i>	232607	13.3 M€	0.7 M€	13.9 M€
<i>SS3</i>	147459	8.4 M€	0.4 M€	8.8 M€
<i>SS4</i>	457051	26.1 M€	1.3 M€	27.4 M€
<i>SS5</i>	370658	21.2 M€	1.1 M€	22.2 M€
Total	1207774	69 M€	3 M€	72 M€

Tableau 12 - Décomposition des coûts énergie et fluides pendant le démantèlement

4.8 Pièces de rechange

Le tableau ci-dessous synthétise la décomposition des coûts de pièces de rechange aux conditions économiques de 2012.

	Assiette PdR	Coût PdR
<i>Tranche 1</i>	109.0 M€	63.2 M€
<i>Tranches ultérieures</i>	47.2 M€	13.8 M€

Tableau 13 - Décomposition des coûts des pièces de rechange

4.9 Synthèse des investissements

L'ensemble des projets d'investissement (construction, jouvence et déconstruction) relatifs aux installations transverses pour le centre de stockage Cigéo a un coût estimé de l'ordre de 1,94 Md€, dont 0,53 Md€ en tranche 1 (hors MOe/MOA).

	T1	Tu	Déman- tèlement	Jouvence	Total
<i>Terrassements généraux</i>	125.8 M€	0.0 M€	6.3 M€	0.0 M€	132 M€
<i>VRD</i>	123.3 M€	0.0 M€	7.4 M€	218.1 M€	349 M€
<i>Bâtiments</i>	32.2 M€	0.0 M€	1.6 M€	68.8 M€	103 M€
<i>Système d'info. industriel</i>	59.5 M€	0.0 M€	3.0 M€	313.1 M€	376 M€
<i>Energies</i>	97.3 M€	0.0 M€	4.9 M€	261.3 M€	363 M€
<i>Fluides et utilités</i>	46.4 M€	0.0 M€	2.3 M€	132.8 M€	181 M€
<i>Installations de chantier</i>	27.7 M€	139.6 M€	5.7 M€	16.8 M€	190 M€
<i>Observation surveillance</i>	19.1 M€	94.4 M€	0.0 M€	103.5 M€	217 M€
<i>Terminal ferroviaire</i>	22.5 M€	0.0 M€	1.1 M€	23.6 M€	47 M€
Total M&T	554 M€	234 M€	32 M€	1 138 M€	1 958 M€
<i>MOe de conception</i>		4.7 M€	0.6 M€	22.8 M€	28 M€
<i>MOe de réalisation</i>	33.2 M€	14.0 M€	1.9 M€	68.3 M€	117 M€
Total MOe	33 M€	19 M€	3 M€	91 M€	146 M€
<i>AMO réglementaires</i>		1.2 M€	0.2 M€	5.7 M€	7 M€
<i>MOA</i>		7.0 M€	1.0 M€	34.1 M€	42 M€
Total MOA		8 M€	1 M€	40 M€	49 M€
Energie et fluides			72 M€		72 M€
Total	587 M€	261 M€	108 M€	1 269 M€	2 225 M€

Tableau 14 - Synthèse des coûts d'investissement

4.10 Analyse des écarts entre Jesq05 et Japs03b

4.10.1 Synthèse des écarts

L'évolution financière entre Jesp05 et Japs03b est de - 110 M€, répartis en :

- Terrassements généraux : -99 M€ ;
- VRD : -16 M€ ;
- Bâtiments conventionnels : - 72 M€ ;
- Energie : +83 M€ (dont +102 M€ lié à une modification de périmètre entre SS4et SS3) ;
- Fluides et utilités : +3 M€ ;
- Installations de chantier : -9 M€.

Le gain sur SS5 est en fait de -196 M€ si l'on exclut le transfert des cellules sectionneurs et disjoncteurs 20 kV initialement implantées en ZSL et valorisées dans le Sous-système 4.

4.10.2 Commentaires

Terrassement généraux

La réduction de 99 M€ du coût prévu du poste « Terrassement généraux » résulte essentiellement des gains générés par la modification de l'altimétrie du site :

- 28 % sur les volumes de déblais ;
- 63% sur les volumes de remblais.

VRD

La baisse de 16 M€ du poste VRD sur l'ensemble des phases provient :

- De la réduction des surfaces et volumes de bassins de gestion des eaux (-9,2 M€) ;

- D'une diminution de 6,9 km des longueurs de clôtures (- 4 M€) ;
- De la ré-estimation des autres postes dont notamment les réseaux (-1M€).

Bâtiments conventionnels

La diminution du coût prévu des bâtiments conventionnels de surface est la conséquence :

- Du transfert entre les Sous-systèmes SS3 et SS5 : -11,4 M€ :
 - ✓ Regroupement des postes de garde SS5 sur SS3 : -14,4 M€ ;
 - ✓ Transfert d'une caserne de pompier de SS3 vers SS5 : +3 M€.
- D'un gain de 60,3 M€ généré par l'optimisation :
 - ✓ Des surfaces ;
 Des types d'ouvrage au niveau des bâtiments « Groupes électrogène (106/107) », « Postes de transformation (104/105) » et « Postes de distribution (188/189) ».

Energie

Les cellules « Sectionneur coupure d'artères 20 kV » et les cellules « Disjoncteurs 20 kV » initialement implantées en ZSL étaient valorisées dans SS4 en phase esquisse. Elles sont maintenant implantées en surface, en zone descenderies. Ce transfert génère un surcoût sur SS5 d'environ 102 M€ (chiffage esquisse) sur l'ensemble des phases.

Par ailleurs, cette nouvelle implantation génère globalement un gain de -19 M€ sur l'ensemble de la fourniture des équipements électriques SS5.

Fluide et utilités

La nomenclature des équipements a été entièrement revue. Cette valorisation fait apparaître un surcoût de 3 M€ pour l'ensemble des phases.

Installations de chantier

Les prévisions de consommations électriques en phases chantier ont été révisées. Le gain est de -9 M€.

4.11 Chronique de dépenses

La chronique de dépenses est calculée selon les hypothèses décrites dans la note « Hypothèses économiques et calendaires ». Elle est ainsi caractérisée par plusieurs périodes :

- 2021 - 2026 : investissement de la tranche 1 (jusqu'à 106 M€/an) ;
- 2029 - 2043 : construction des bâtiments en remplacement de ceux du Laboratoire souterrain, extension des verses et du réseau d'observation-surveillance en lien avec l'extension de l'architecture souterraine (~2 M€/an) ;
- 2044 - 2139 : jouvence des installations et poursuite de l'extension des verses et du réseau d'observation-surveillance (~14 M€/an) ;
- 2140 - 2156 : déconstruction des installations et maintien des installations durant le démantèlement (~9 M€/an).

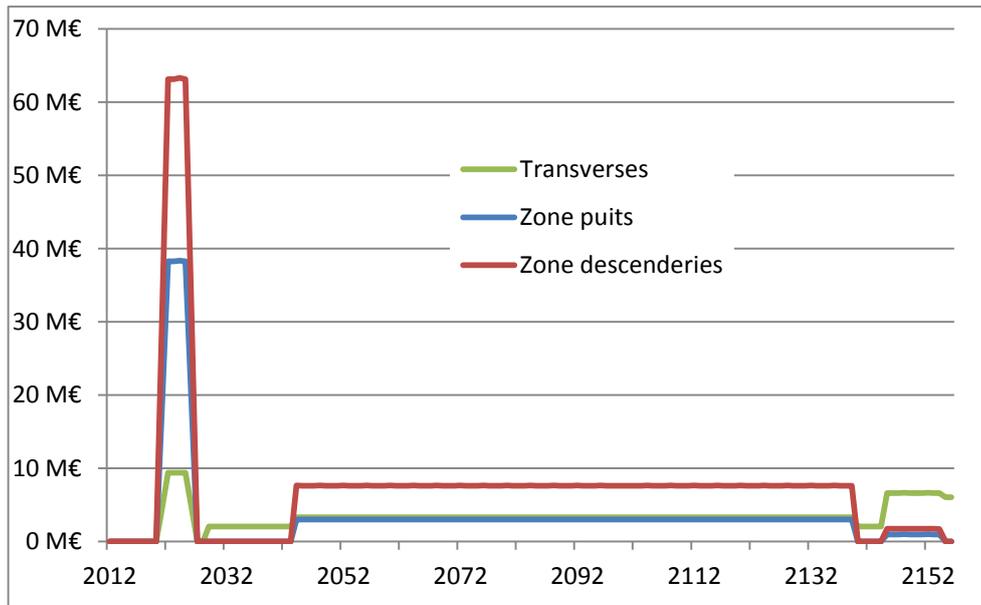


Figure 5 - Chronogramme des dépenses pour le coût de base

CHIFFRAGE CIGÉO EN PHASE ESQUISSE

Estimation du coût de base

Utilités externes et aménagements hors site (SS6)

Identification

CG.TE.F.NTE.AMOA.EEE.6000.14.0065/B

Octobre 2014

Pages : **16**

SOMMAIRE

1.	Objet du document	5
2.	Présentation des aménagements à réaliser	5
2.1	<i>Utilités externes</i>	5
2.1.1	Raccordement au réseau de transport de l'électricité	5
2.1.2	Raccordement aux réseaux d'eau	6
2.1.3	Raccordement au réseau Télécom	8
2.1.4	Raccordement au réseau Gaz	9
2.1.5	Gestion des déchets	10
2.2	<i>Aménagements hors site</i>	10
2.2.1	Aménagements sur le réseau ferroviaire	10
2.2.2	Aménagements sur le réseau routier	11
3.	Méthodologie de chiffrage	13
3.1	<i>Hypothèses</i>	13
3.2	<i>Processus de Chiffrage et méthodologie</i>	13
4.	Estimation	14
4.1	<i>Prix unitaires moyens composites</i>	14
4.1.1	Réseaux	14
4.1.2	Travaux routiers et ferroviaire	14
4.2	<i>Périmètre</i>	14
4.3	<i>Synthèse des coûts d'investissement</i>	15

TABLES DES ILLUSTRATIONS

Figures

<i>Figure 1 - Schéma du raccordement électrique au réseau public de transport d'électricité</i>	6
<i>Figure 2 - Schéma interdépartemental d'adduction d'eau secteur Bure/Saudron</i>	7
<i>Figure 3 - Schéma interdépartemental d'assainissement secteur Bure/Saudron</i>	8
<i>Figure 4 - Schéma du raccordement direct au réseau national GRT-Gaz</i>	9
<i>Figure 5 - Aménagement du réseau ferroviaire</i>	11
<i>Figure 6 - Aménagement du réseau routier</i>	12

Tableaux

<i>Tableau 1 - Synthèse des coûts d'investissement</i>	15
--	----

1. Objet du document

L'implantation de Cigéo nécessite la création de nouvelles infrastructures (routières, ferroviaires...) et l'aménagement d'infrastructures existantes, ainsi que la réalisation de réseaux pour acheminer sur le futur Centre de stockage les utilités nécessaires (électricité, eau, gaz...) pour sa construction et son exploitation.

Une partie de ces aménagements est élaborée dans le cadre du schéma interdépartemental de développement du territoire (SIDT) dont le Gouvernement a confié l'élaboration au Préfet de la Meuse (préfet coordinateur du projet Cigéo), en lien avec les acteurs locaux et les différents maîtres d'ouvrage concernés.

Le présent document fournit les premiers éléments de chiffrage qui seront précisés dans la suite des études avec les maîtres d'ouvrages concernés.

Il ne préjuge pas des modalités futures de financement des différentes actions à mettre en œuvre pour réaliser ce programme ni des modes de financement des frais d'entretien de ces installations.

2. Présentation des aménagements à réaliser

2.1 Utilités externes

2.1.1 Raccordement au réseau de transport de l'électricité

Les études rendues au jalon J_{esq} 05 montrent que le projet Cigéo nécessite une puissance de raccordement de l'ordre de 110 MW :

- 70 MW pour la zone « Descenderie » ;
- 40 MW pour la zone « Puits ».

Cette puissance correspond aux besoins du projet (creusement, exploitation, ventilation, ...) et tient compte des contraintes liées à la redondance de l'alimentation électrique liée à l'INB.

La redondance de l'alimentation électrique implique par ailleurs le doublement des organes constituant le raccordement : transformateur, liaison souterraine, etc.

En conformité avec l'article 5 de l'arrêté du 4 juillet 2003, la définition du schéma de raccordement et le raccordement électrique relèvent de la responsabilité de RTE (Réseau de Transport d'Electricité), gestionnaire des réseaux haute tension supérieure à 50kV.

L'étude réalisée conduit RTE à retenir un raccordement sur le Réseau Public de Transport d'électricité 400 kV et un poste de livraison 90kV sur chaque site de Cigéo (cf. figure ci-après). Le raccordement électrique sera constitué :

- D'un poste 400kv/90kv (❶ ou ❷) ;
- De liaisons souterraines en 90 kV ;
- De deux postes de livraison 90 kV (1 sur la zone descenderie et 1 sur la zone puits).

Le choix d'implantation du point de raccordement au réseau 400 kV n'est pas encore arrêté par RTE.

Sous réserve des autorisations nécessaires, la réalisation des aménagements est programmée d'ici 2019 en support à la préparation du chantier.

Suite à la signature du contrat entre l'Andra et RTE en juillet 2014, le montant estimatif du marché du raccordement électrique s'élève à 36 084 600 € en euros courants (2014). Ce montant est d'environ 35 M€ ramené aux conditions économiques de janvier 2012 avec une hypothèse de -1,5% par an.

Le montant définitif sera fourni à l'issue des études de détail avec l'objectif de ne pas dépasser 15% de l'estimatif.

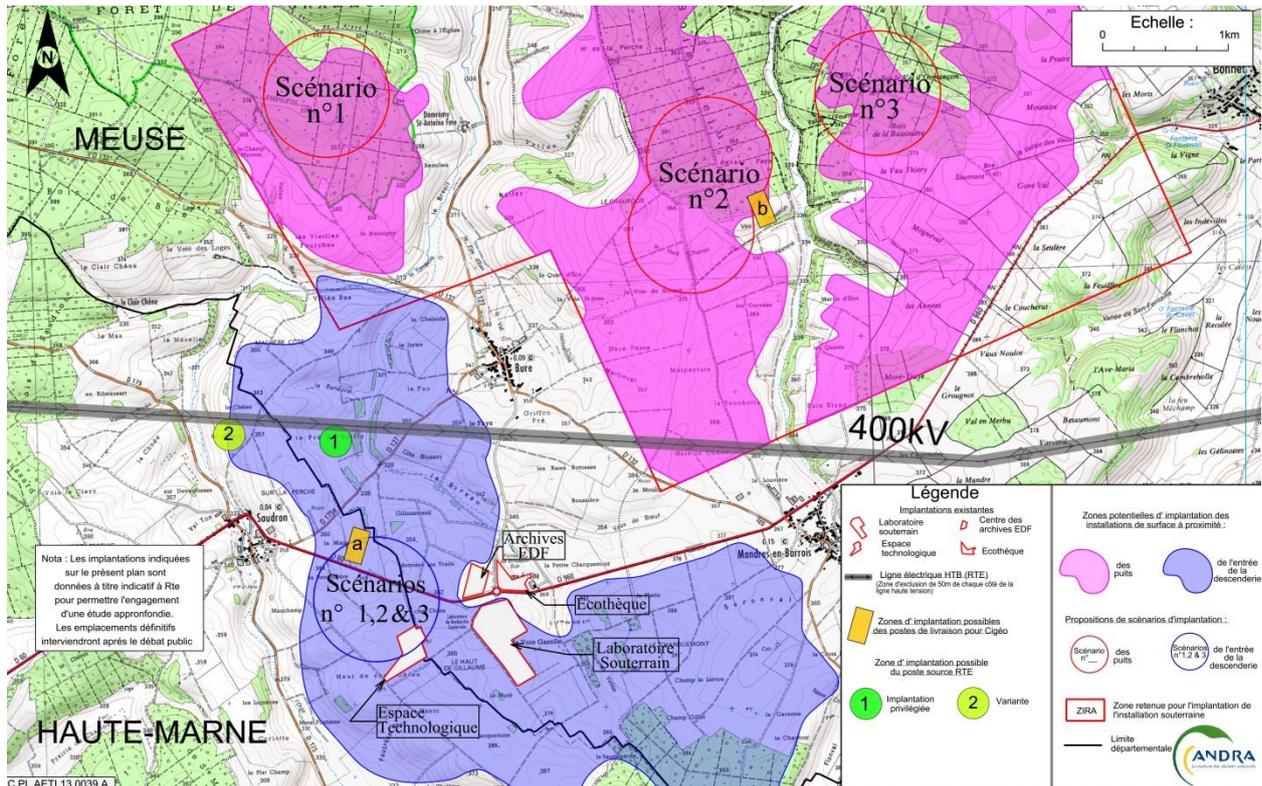


Figure 1 - Schéma du raccordement électrique au réseau public de transport d'électricité

2.1.2 Raccordement aux réseaux d'eau

2.1.2.1 Eau potable

Les besoins en eau potable sont de 500 m³/jour pour la période initiale de construction.

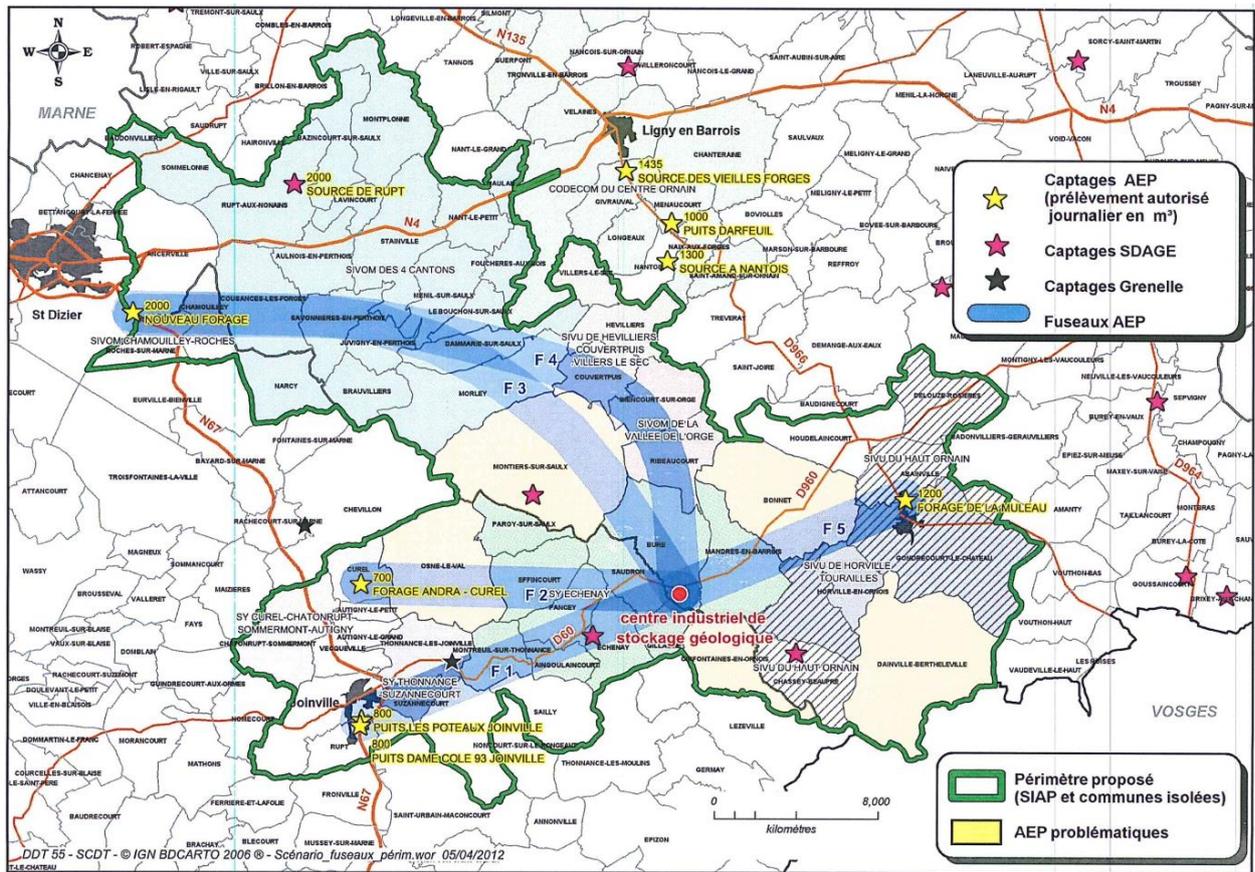
La mise en œuvre du schéma directeur d'assainissement, de gestion des eaux pluviales et des effluents liquides de Cigéo permettra de réduire progressivement les besoins en eau potable à 100 m³/jour en phase d'exploitation.

Les études ont exploré différentes possibilités d'alimentation en eau potable :

- Etude de faisabilité technico-économique et avant-projet par le syndicat d'Echenay (alimentation par Joinville), qui assure l'alimentation en eau du laboratoire souterrain ;
- Schéma directeur d'assainissement et d'alimentation en eau de la zone interdépartementale Bure/Saudron par l'Établissement Public de Coopération Interdépartementale (EPCID) Meuse/Haute-Marne ;
- Fourniture d'eau brute depuis le forage de Curel (et potabilisation sur site Cigéo).

L'alimentation depuis la vallée de la Marne est privilégiée sur le plan technique (disponibilité de la ressource, captages existants, mutualisation possible des travaux alimentation en eau potable et assainissement).

La réalisation des aménagements est programmée d'ici 2019 en support à la préparation du chantier.



2.1.2.2 Rejets des eaux

L'EPCID Meuse/Haute-Marne a lancé des études pour la définition d'un schéma directeur d'assainissement et d'alimentation en eau de la zone interdépartementale Bure/Saudron.

La réalisation des aménagements nécessaires à Cigéo est programmée d'ici 2019 en support à la préparation du chantier.

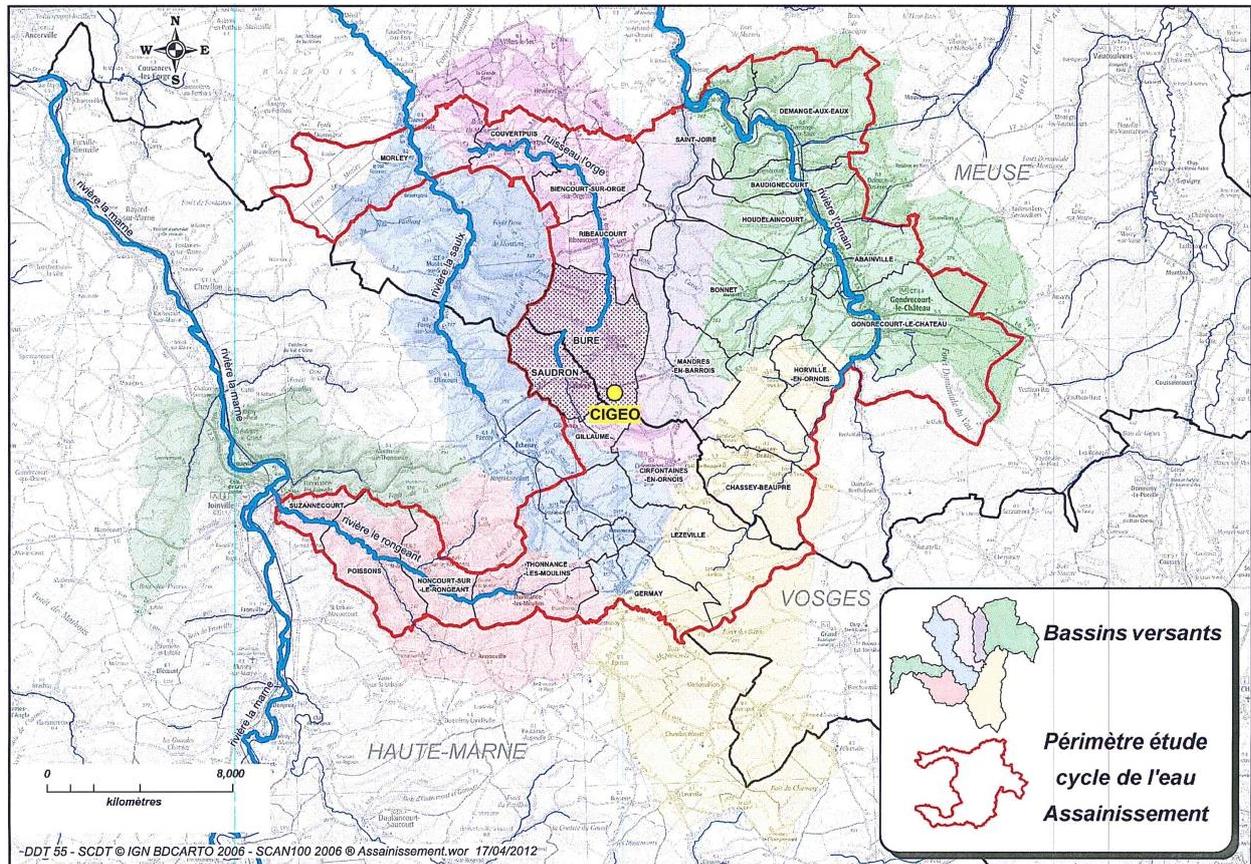


Figure 3 - Schéma interdépartemental d'assainissement secteur Bure/Saudron

2.1.3 Raccordement au réseau Télécom

L'implantation de Cigéo nécessitera le déploiement de réseaux de fibres optiques. Des lignes sécurisées pourraient être nécessaires pour équiper le PC Crise en liaison avec par exemple la préfecture, l'ASN, le siège de l'Andra, etc. sans toutefois influencer sur le mode de raccordement aux réseaux de fibres optiques (pas de réseau dédié à priori).

2.1.4 Raccordement au réseau Gaz

En complément des autres sources d'énergie, une alimentation du site en gaz naturel est prévue. Le bilan de consommation en gaz naturel des utilités est établi à partir des équipements de production de l'eau chaude, le chauffage, la restauration, la buanderie, ... La chaufferie nécessite d'avoir une redondance de combustible (dual Gaz-Fioul).

Le projet Cigéo nécessitera un débit annuel de gaz naturel compris entre 15 000 et 30 000 MWh PCS (Pouvoir Calorifique Supérieur).

L'option retenue est celle d'un raccordement direct au réseau national GRT gaz représenté sur le plan ci-dessous.

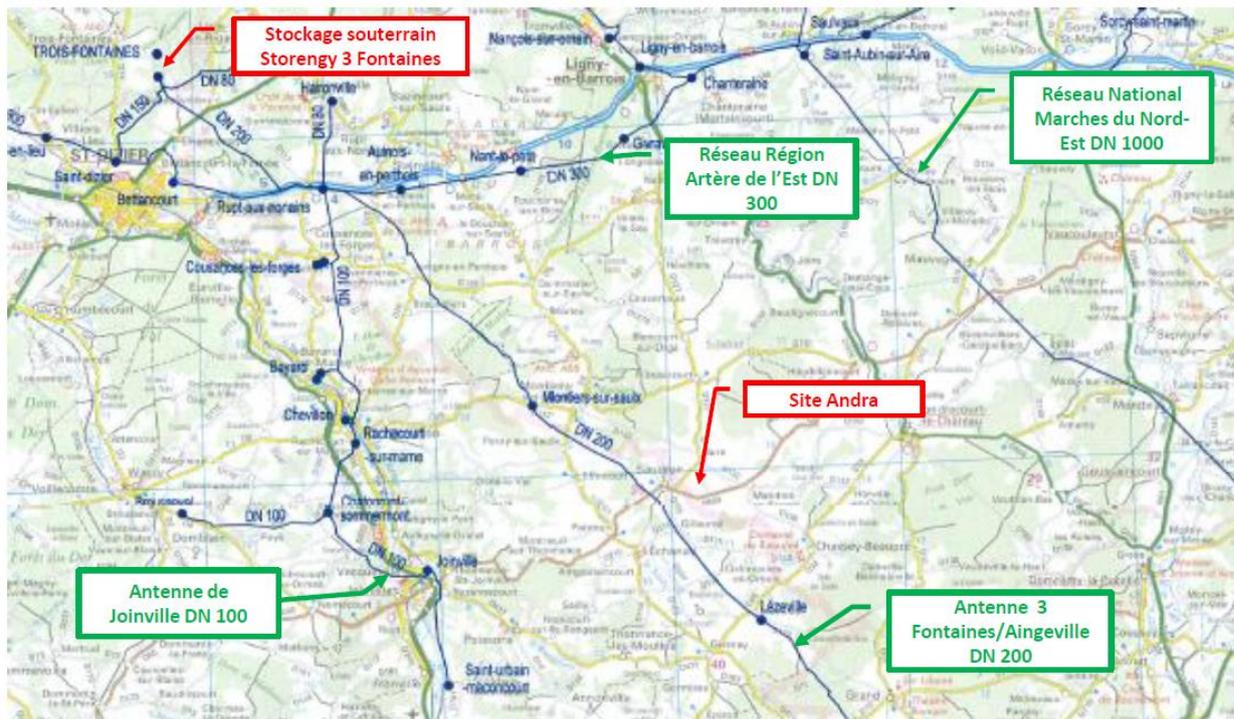


Figure 4 - Schéma du raccordement direct au réseau national GRT-Gaz

Les réseaux retenus pour étudier le raccordement du projet sont :

- La canalisation régionale de l'Est à 19 km ;
- La canalisation nationale « Marches de Nord-Est » à 20 km.

Les deux autres possibilités non retenues étaient :

- L'antenne de Joinville située à 14 km mais ne disposant que de capacités limitées ;
- Le DN200 situé à 2 km reliant le site de stockage Storengy de Trois Fontaines au réseau national « Artère du Nord-est » ne permettant pas quant à lui, d'avoir une qualité constante de gaz (PCS inférieur à la valeur réglementaire minimum).

GRT-Gaz fournira également les postes de détente à l'entrée de chacun des deux sites de surface de Cigéo.

L'éloignement du site par rapport à ces canalisations influe directement sur les prix. A ce stade et aux conditions économiques actuelles (indice 2012), le coût du raccordement évalué par GRT-Gaz est de l'ordre de 20 M€. Cette estimation sera consolidée par une étude de faisabilité réalisée par GRT-Gaz.

La réalisation des aménagements est programmée d'ici 2025 en support à l'exploitation.

2.1.5 Gestion des déchets

Différentes filières de gestion des déchets sont à mettre en place pour Cigéo :

- Déchets industriels banals ;
- Déchets ménagers ;
- Déchets inertes.

Les coûts associés à ces filières de gestion n'ont pas été évalués à ce stade du projet.

Les études liées à la construction des bâtiments de tri des déchets conventionnels sont en cours. Les dépenses d'exploitation seront financées par les frais de fonctionnement.

2.2 Aménagements hors site

2.2.1 Aménagements sur le réseau ferroviaire

L'option d'une desserte ferroviaire directe de Cigéo a été retenue suite au débat public. Cette desserte nécessite la création d'une voie nouvelle de 14 km pour constituer l'Installation Terminale Embranchée (ITE) de Cigéo.

Cette desserte ferroviaire pourra s'appuyer pour partie sur un ancien tracé désaffecté reliant Gondrecourt-le-Château (55) à Joinville (52). Ce tracé est représenté sur l'extrait de plan ci-après. L'Etat a désigné l'Andra comme maître d'ouvrage (MOA) de ce raccordement.

Deux terminaux Fret seront aménagés pour les besoins du projet :

- Le premier sera situé sur l'emprise d'une friche industrielle à Gondrecourt-le-Château dont l'Andra a la maîtrise foncière ;
- Le deuxième à proximité de Cigéo.

Temporellement, le site de Gondrecourt-le-Château (attenant à la ligne existante) sera aménagé avant l'engagement des travaux de création de l'ITE pour permettre l'approvisionnement des matériaux et équipements pour ce chantier ferroviaire.

Par la suite, le site disposant de bâtiments existants avec un clos et couvert en bon état et une importante superficie (de l'ordre de 1 ha), permettra un stockage tampon avant acheminement vers Cigéo. Le deuxième terminal sera mis en service en amont des travaux de creusement pour permettre le transfert des matériaux, ouvrages et équipements par l'ITE nouvellement créée.

Les différentes estimations financières (y compris MOA/MOe) pour la réalisation d'une ITE sont les suivantes :

- 115 M€ par bl Consulting Infra (étude réalisée sous maîtrise d'ouvrage Andra) ;
- 66 M€ par GAIYA (étude réalisée sous maîtrise d'ouvrage Andra) ;
- 49 M€ par SYSTRA (étude réalisée sous maîtrise d'ouvrage EDF, CEA, AREVA) ;
- 56 M€ par SIGMA Conseil (étude réalisée sous maîtrise d'ouvrage Andra).

Ces montants intègrent les aléas de réalisation (25 à 30 %). Ces estimations sont basées sur le tracé rouge du plan ci-après transitant pour partie sur une voie désaffectée.

Le chiffrage devra être précisé sur la base d'études plus détaillées. En effet, les différentes estimations citées ci-avant ont été faites sur des périmètres différents, excluant de fait les comparaisons directes.

A ce stade du projet, il est retenu comme hypothèse de chiffrage la valeur de l'évaluation réalisée par SIGMA Conseil, soit 49 M€ (CE 2012) hors MOA/MOe, montant estimé sur un périmètre cohérent avec la définition du projet au jalon J_{aps} 03b.

La réalisation du raccordement est programmée d'ici 2020 en support à la phase chantier.

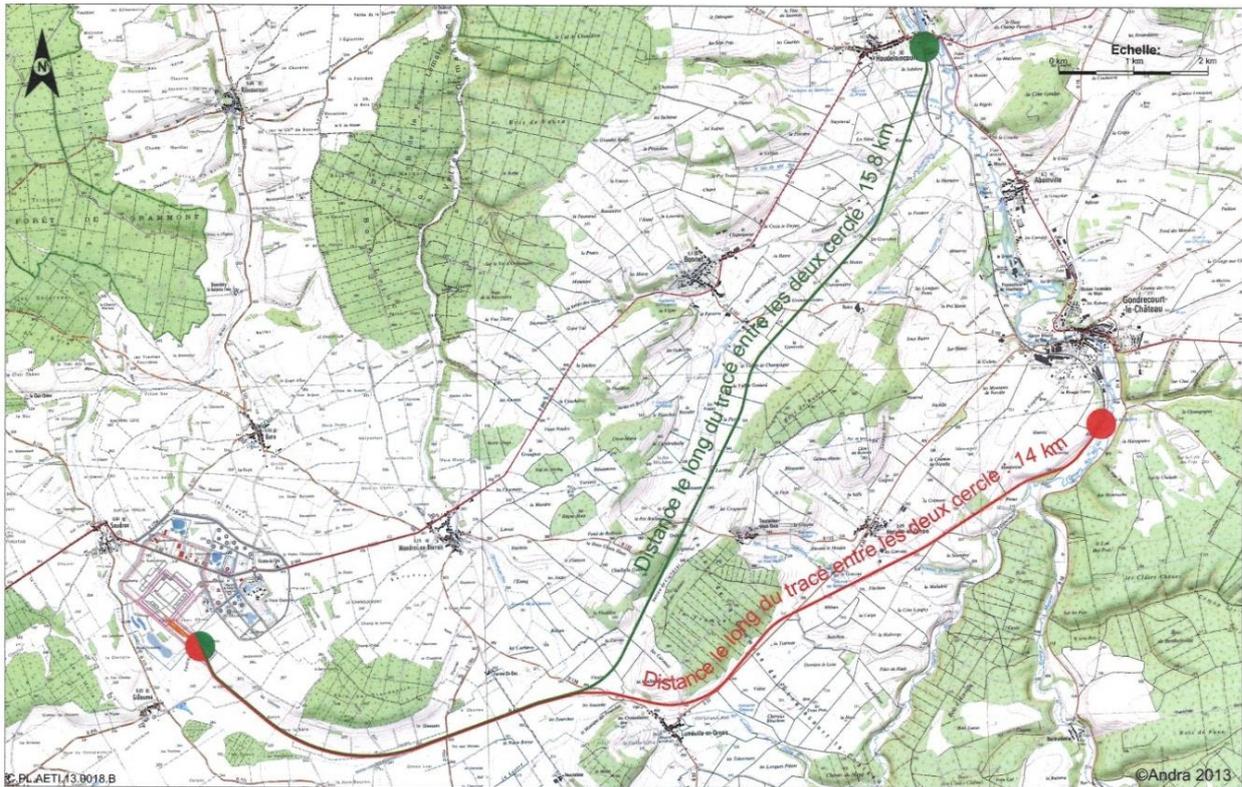


Figure 5 - Aménagement du réseau ferroviaire

La ligne existante depuis Nantois jusqu'à Gondrecourt-le-Château nécessite d'être renforcée pour accepter les charges induites par les convois. Une estimation préliminaire des travaux de confortement réalisée par SYSTRA (étude réalisée par les producteurs dans le cadre du SIDT) a évalué le coût de cette opération de l'ordre de 30 M€. La maîtrise d'ouvrage de l'aménagement de cette ligne existante relève de RFF (Réseau Ferré de France). La réalisation de ces travaux est à programmer d'ici 2020, en parallèle de la réalisation du raccordement ferroviaire.

2.2.2 Aménagements sur le réseau routier

A proximité immédiate de Cigéo, les aménagements routiers à réaliser sont la déviation de la RD960/60 au niveau de la zone descendrière ainsi que l'aménagement de la liaison entre la zone descendrière et la zone puits. Ces aménagements sont prévus d'être réalisés sous la maîtrise d'ouvrage de l'Andra, selon des modalités à définir avec les départements. La réalisation de ces aménagements est programmée d'ici 2018 en support aux travaux préparatoires sur les zones puits et descendrières.

Les autres aménagements éventuels du réseau existant sont étudiés dans le cadre du SIDT. Les gestionnaires des réseaux routiers ont défini plusieurs scénarios de desserte routière représentés sur la carte ci-après.

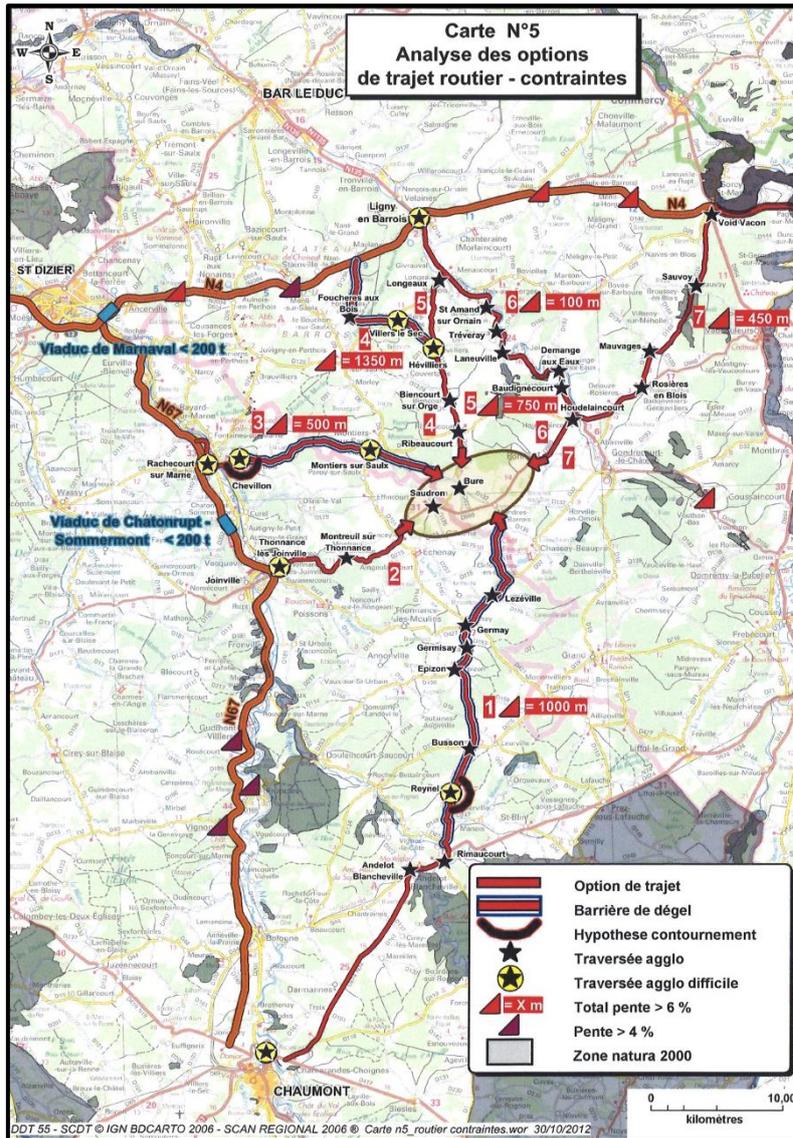


Figure 6 - Aménagement du réseau routier

3. Méthodologie de chiffrage

3.1 Hypothèses

Le chiffrage est réalisé aux conditions économiques de 2012 et tous les coûts sont proposés hors taxe.

Les hypothèses suivantes ont été retenues pour réaliser une estimation préliminaire des investissements :

- Raccordement au réseau de transport de l'électricité :
 - ✓ Le poste est provisionné sur la base du montant du contrat entre l'Andra et RTE. Il est à noter que le chiffrage n'intègre pas le coût d'un 3^{ème} transformateur éventuel ultérieur.
- Raccordement au réseau d'eau potable :
 - ✓ Le point de raccordement est situé à 20 km.
- Rejet des eaux traitées :
 - ✓ Le point de rejet est situé à 20 km.
- Raccordement au réseau Télécom :
 - ✓ Les points de raccordement aux réseaux de fibre sont situés à 10 km.
- Raccordement au réseau gaz :
 - ✓ Le point de raccordement est situé à une distance de 19 à 20 km ;
 - ✓ Le poste est provisionné sur les bases de l'évaluation préliminaire réalisée par GRT-Gaz.
- Gestion des déchets :
 - ✓ Les études pour les infrastructures sont réalisées par le sous-système 5 (SS5) ;
 - ✓ La prise en charge et le traitement des déchets conventionnels sera à imputer sur les frais de fonctionnement.
- Aménagements sur le réseau ferroviaire :
 - ✓ La desserte directe du site s'effectuera sur la voie existante (à renforcer entre Nançois et Gondrecourt-le-Château) et une nouvelle voie à créer sur un ancien tracé (entre Gondrecourt-le-Château et le site de Cigéo) ;
 - ✓ La desserte ferroviaire intègre l'aménagement d'un terminal Fret pour les besoins de Cigéo et l'aménagement de la plateforme de Gondrecourt-le-Château.
- Aménagements sur le réseau routier :
 - ✓ Le contournement de la RD 960/60 (environ 3 km) ;
 - ✓ L'aménagement de la liaison routière entre la zone « descenderie » et la zone « puits » (environ 7 km).

Ces estimations seront précisées dans la suite du projet en lien avec les maîtres d'ouvrages concernés.

3.2 Processus de Chiffrage et méthodologie

Compte-tenu du niveau d'avancement des études, les processus de chiffrage et la méthodologie employée sont variables en fonction des investissements.

- Contrat passé pour :
 - ✓ RTE - raccordement réseau électrique.
- Consultation pour :
 - ✓ GRT-Gaz - raccordement réseau gaz.
- Etudes spécifiques pour :
 - ✓ L'aménagement du réseau ferroviaire.
- Provisions pour toutes les autres estimations à ce stade du projet, sur la base de prix unitaires moyens composites :
 - ✓ Les réseaux d'eau potable et les rejets ;
 - ✓ Le raccordement au réseau Télécom ;
 - ✓ Les routes.

4. Estimation

4.1 Prix unitaires moyens composites

4.1.1 Réseaux

Sources d'estimation

- Le prix moyen de 300 €/m des réseaux de distribution et d'assainissement de l'eau résulte d'une analyse des investissements réalisés par différentes agences de l'eau :
 - ✓ 150 à 200 €/m pour la tranchée et la canalisation (coût variable en fonction du diamètre et de la profondeur d'enfouissement) ;
 - ✓ 50 à 100 €/m pour les ouvrages spéciaux et sujétions particulières de mise en place ;
 - ✓ 50 €/m pour les reprises de voiries.
- En se basant sur les 300 €/m pour le prix d'un réseau d'eau, l'hypothèse d'un prix moyen de 100 €/m de liaison au réseau Télécom a été retenu en considérant qu'une partie du cheminement du réseau de fibre optique serait réalisé via les réseaux électriques existants.

4.1.2 Travaux routiers et ferroviaire

Sources d'estimations

- Le prix des routes est issu d'une étude du Ministère des Transports de 2006 relative au coût de création de routes à 2x2 voies. Le prix moyen d'une route à 1X1 voie a été extrapolé sur la base de 60% de ce prix moyen au km réactualisé aux conditions économiques de 2012 via l'indice TP01, soit 4 M€/km ;
- Le prix moyen au km de déviation de contournement 1x1 voie résulte d'une analyse des montants des investissements réalisés par différents Conseils Généraux. Le prix moyen constaté est de 4 M€/km.

4.2 Périmètre

Sont exclus de cette estimation :

- Les coûts de maîtrise d'œuvre ;
- Les coûts de maîtrise d'ouvrage ;
- Les assurances ;
- Les impôts et taxes.

4.3 Synthèse des coûts d'investissement

Ce tableau récapitule par nature de travaux les quantités prises en compte au niveau du chiffrage, ainsi que les prix moyens composites associés. Ce chiffrage ne préjuge pas des modalités futures de financement.

Nature des travaux	Qté	Unité	Total (en k€)
Raccordement réseau électrique (contrat RTE)	1	ens	35 026
Raccordement réseau d'eau	20	km	6 000
Rejets des eaux	20	km	6 000
Raccordement réseau Télécom	10	km	1 000
Raccordement réseau Gaz	20	km	20 000
Gestion des déchets			Frais fonct.
Création ligne ferroviaire (y/c terminal ferroviaire fret)	14,7	km	49 000
Renforcement ligne ferroviaire existante			30 000
Aménagements routiers	10	km	40 000
TOTAL			187 026

Tableau 1 - Synthèse des coûts d'investissement

CHIFFRAGE CIGÉO EN PHASE ESQUISSE

Estimation du coût de base

Systeme de transfert incliné des hottes (SS8)

Identification

CG.TE.F.NTE.AMOA.EEE.8000.14.0066/B

Octobre 2014

Pages : **14**

SOMMAIRE

1.	Objet du document	5
2.	Conception et dimensionnement du système de transfert incliné des hottes	5
2.1	<i>Contenu technique du sous-système (SS8)</i>	5
2.2	<i>Principes de conception</i>	5
2.3	<i>Dimensionnement</i>	5
2.3.1	Contraintes de conception	5
2.3.2	Implantation générale de l'équipement	6
2.3.3	Interfaces	6
2.3.4	Caractéristiques de l'équipement	7
3.	Méthodologie de chiffrage	8
3.1	<i>Investissements de la tranche 1</i>	8
3.2	<i>Maîtrise d'œuvre, maîtrise d'ouvrage et AMO réglementaires</i>	8
3.3	<i>Démantèlement</i>	8
3.4	<i>Jouvence</i>	8
3.5	<i>Pièces de rechange</i>	9
4.	Estimation du coût de base	9
4.1	<i>Organisation du marché</i>	9
4.2	<i>Périmètre et limites de prestations</i>	9
4.3	<i>Investissement de la tranche 1</i>	10
4.4	<i>Jouvence</i>	11
4.5	<i>Démantèlement</i>	11
4.6	<i>Pièces de rechange</i>	11
4.7	<i>Synthèse des investissements</i>	12
4.8	<i>Analyse des écarts entre J_{esq} 05 et J_{aps} 03b</i>	12
4.9	<i>Chronique de dépenses</i>	13

TABLES DES ILLUSTRATIONS

Figures

Figure 1 - Schéma de l'emprise du système de transfert incliné	6
Figure 2 - Schéma de la configuration du funiculaire	7
Figure 3 - Chronogramme des dépenses pour le coût d'investissement	13

Tableaux

Tableau 1 - Taux de MOe, MOA et AMO réglementaires	8
Tableau 2 - Ratios appliqués par nature de poste pour les pièces de rechange	9
Tableau 3 - Tableau de synthèse des coûts d'investissement	10
Tableau 4 - Tableau de synthèse des coûts de jouvence	11
Tableau 5 - Tableau de synthèse des coûts de démantèlement	11
Tableau 6 - Tableau de synthèse des coûts de pièces de rechange	11
Tableau 7 - Synthèse des investissements	12
Tableau 8 - Analyse des écarts	12

1. Objet du document

Ce document a pour objet de présenter le chiffrage du coût de base du système de transfert incliné des hottes (funiculaire) constituant le sous-système 8 (SS8).

2. Conception et dimensionnement du système de transfert incliné des hottes

La conception du système de transfert surface-fond des hottes résulte de l'optimisation des systèmes développés dans le cadre du Dossier 2009 de l'Andra dont les études ont été reprises par la maîtrise d'œuvre système (MOe-S) dans le cadre des études d'esquisse.

2.1 Contenu technique du sous-système (SS8)

Le sous-système 8 comprend :

- Le funiculaire ;
- Ses aménagements auxiliaires (rails, gare haute, gare basse, charpente secondaire liée à la fonction de transfert en descenderie) ;
- Les moyens de rapatriement de la hotte dans toutes les conditions de pannes ou de dysfonctionnement.

2.2 Principes de conception

Le SS8 a pour fonction principale le transfert des hottes le long du tunnel de descenderie entre la surface et le fond. Les différents principes de fonctionnement retenus sont les suivants :

- Il fonctionne à vide et en charge dans les deux sens de marche,
- Les hottes peuvent indifféremment contenir un colis de stockage ou être vides ;
- Le funiculaire a une fonction complémentaire de soutien aux opérations de déploiement, de maintenance et de démantèlement. Le moyen de transfert incliné sera ainsi utilisé pour transporter des charges autres que les hottes ;
- Le fonctionnement du sous-système fait l'objet d'une automatisation dont la supervision et la coordination est effectuée à un niveau supérieur ;
- La présence de charges radioactives constitue une contrainte d'exploitation ;
- Les flux de matériel induits par les activités du SS8 peuvent transiter par les différentes zones du site qui sont sous la responsabilité d'autres sous-systèmes.

2.3 Dimensionnement

2.3.1 Contraintes de conception

Au stade du jalon J_{aps} 03b, le dimensionnement du funiculaire est fondé sur les caractéristiques et contraintes principales suivantes :

- Dénivelé : environ 500 m ;
- Pente : environ 12 % ;
- Longueur : 4,2 km ;
- Charge utile maximale de dimensionnement : 130 tonnes ;
- Disponibilité : de l'ordre de 99.6%
- Durée totale d'exploitation : de l'ordre de 120 ans ;
- Temps de cycle : une heure (aller-retour), hors phase de chargement/déchargement dont la responsabilité est portée par le Sous-Système 1 ;
- Réglementation :
 - ✓ Textes réglementaires d'application obligatoire :
 - Code du travail ;
 - Arrêté du 7 février 2012.
 - ✓ Documents applicable :
 - Référentiel sûreté CIGEO ;

- Référentiel incendie CIGEO.
- ✓ Documents applicables en support à la conception :
 - Directive 2006/42/CE relative aux machines et retranscrite dans le code du travail ;
 - Directive 2000/9/CE relative aux installations de transport par câble transportant des personnes ;
 - Décret 2003-425 du 9 mai 2003 relatif à la sécurité des transports publics guidés.

2.3.2 Implantation générale de l'équipement

Au stade actuel du projet (fin d'esquisse), l'emprise du dispositif de transfert incliné s'étend sur 8 zones (de l'amont vers l'aval) :

1. Zone située entre l'extérieur et la salle des machines ;
2. Salle des machines (treuils, motorisation, fosse de tension...)
3. Zone d'entretien ;
4. Gare amont (ou de surface) ;
5. Tunnel ;
6. Gare aval (ou de fond) ;
7. Zone de sécurité ;
8. Zone pour ensemble de renvoi câbles.

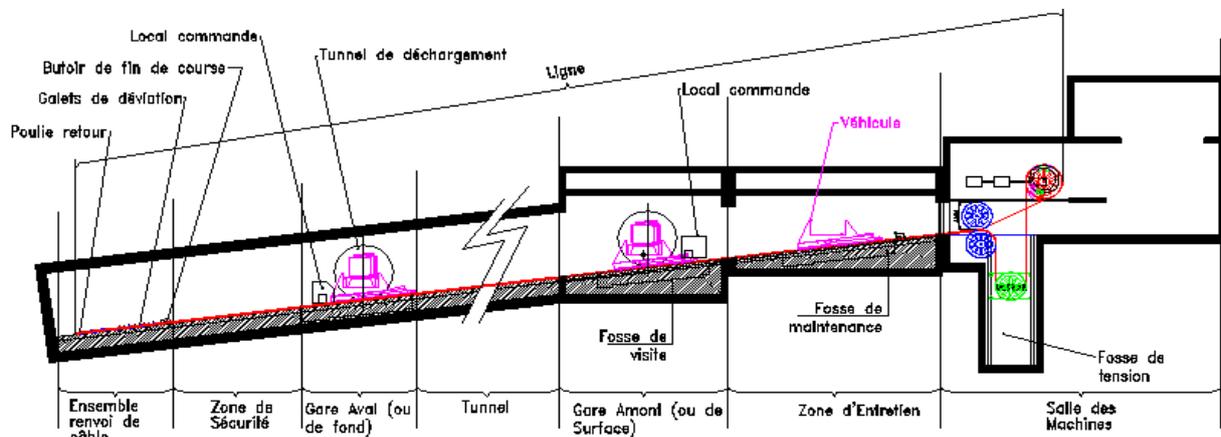


Figure 1 - Schéma de l'emprise du système de transfert incliné

2.3.3 Interfaces

L'interface avec le bâtiment nucléaire de surface est réalisée au niveau de la zone « tête de descenderie colis ». Ce bloc sous la responsabilité de SS2 (commun à EP1 et EP2) abrite la salle des machines, la zone de maintenance et la gare amont.

L'interface avec les ouvrages souterrains (SS4) est réalisée au niveau de la descenderie d'exploitation colis et de la gare basse (hors périmètre SS8).

L'interface avec le process nucléaire (SS1) est constituée par les hottes de transfert.

L'interface avec les ensembles transverses (SS5) pour le contrôle commande.

2.3.4 Caractéristiques de l'équipement

La configuration est à boucle de câble unique, avec un seul véhicule, sans contrepoids de voie et avec une motrice-tension en gare amont.

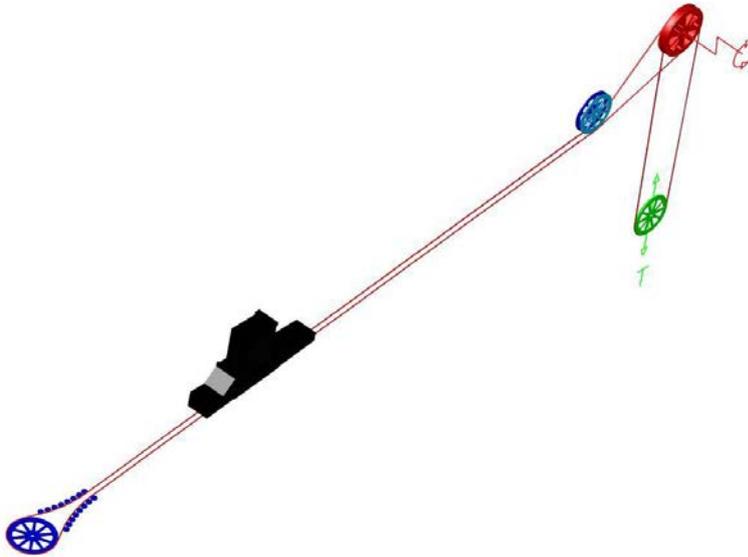


Figure 2 - Schéma de la configuration du funiculaire

Les principales caractéristiques de l'installation sont les suivantes :

- Le poids du véhicule à vide est de 45 t (175 t en charge) ;
- La voie est sans croisement (véhicule unique), elle est fixée directement sur le génie civil secondaire du tunnel ;
- Les rails sont dimensionnés au séisme et des butoirs sont installés en extrémités de voies ;
- Les câbles sont supportés en ligne par des galets placés tous les 20 m environ ;
- la machinerie abrite deux treuils de puissance nominale. La disposition permet de diminuer les risques en termes d'incendie ;
- La motorisation de secours consiste en un ou des moteurs indépendants ;
- La mise en tension est assurée par un contrepoids ;
- Le véhicule se compose d'un châssis mécano-soudé, équipé de roues montées sur balancier. Des pièces d'anti-soulèvement empêchent son déraillement. Il est muni de freins de voie et d'un système de freinage par grappin et dent de loup.

3. Méthodologie de chiffrage

Le chiffrage est présenté aux conditions économiques de janvier 2012 et tous les coûts sont présentés hors taxe.

3.1 Investissements de la tranche 1

Lors de la phase d'études d'esquisse, la maîtrise d'œuvre système a repris les études réalisées par l'Andra et a mené sa propre analyse technico-économique. La consolidation, l'optimisation et le chiffrage du concept de transfert par funiculaire a été réalisé par la société DCSA, spécialisée dans la conception de système de transport par câble.

En juillet 2014, un marché de conception/réalisation a été passé avec la société POMAGALSKI. L'ensemble des éléments sont intégrés dans la présente note.

Toutefois, certains postes ne sont pas chiffrés dans le marché et font l'objet d'une estimation de la part de l'Andra avant la livraison par le titulaire de son dossier de chiffrage prévu en fin d'APS. Il s'agit en particulier :

- De la jouvence ;
- Du démantèlement ;
- Des pièces de rechange au-delà des 5 premières années (cf. note sur l'exploitation) ;
- Des coûts de MOA, de MOe et d'AMO réglementaires associés.

3.2 Maîtrise d'œuvre, maîtrise d'ouvrage et AMO réglementaires

Les hypothèses de chiffrage sont présentées dans la note « Estimation du coût de base de maîtrise d'œuvre et de maîtrise d'ouvrage », le tableau suivant présente les taux retenus.

Tranches	Types	Ratios
T1	MOe de conception	Conforme au bordereau des prix du marché passé et intégré au PMT
	MOA	Intégrées au PMT et présentées dans la note MOe/MOA
	AMO réglementaires	
	MOe de réalisation	10%
Tu	MOe de conception	2%
	MOA	3%
	AMO réglementaires	0.5%
	MOe de réalisation (y/c jouvence et démantèlement)	10%

Tableau 1 - Taux de MOe, MOA et AMO réglementaires

3.3 Démantèlement

Les coûts de démantèlement sont établis à partir de ratios appliqués aux postes de M&T, hors essais de qualification.

En s'appuyant sur les REX fournis par les producteurs, la valeur retenue pour le chiffrage est de 10%.

3.4 Jouvence

Il est prévu le remplacement complet de l'équipement (machinerie, véhicule, rails...) au cours de l'exploitation du stockage. Au stade actuel des études, cette jouvence est positionnée en 2100, à l'issue de l'exploitation des déchets MAVL.

Le coût de l'opération de jouvence est estimé à :

- 10% du coût initial de construction pour la dépose de l'équipement ;
- Au coût initial de construction (hors essais de qualification) pour la fabrication et la mise en place de l'équipement neuf.

3.5 Pièces de rechange

Au-delà des 5 premières années d'exploitation et à ce stade des études, le montant annuel des pièces de rechange est estimé sur la base de ratios par nature de poste. Cette valeur s'appuie principalement sur deux retours d'expérience :

- Société REEL pour la maintenance de certains équipements mécanique de La Hague ;
- Société SKIRAIL pour la maintenance de funiculaires.

Le tableau suivant présente les ratios appliqués.

Natures de poste	Ratios
Mécanique	0.50%
Electricité	0.25%

Tableau 2 – Ratios appliqués par nature de poste pour les pièces de rechange

4. Estimation du coût de base

Le chiffrage du sous-système 8 présente une particularité par rapport aux autres sous-systèmes. En effet, le montage industriel a été défini au cours de l'esquisse. Un marché de conception/réalisation a été attribué en juillet 2014 à la société POMAGALSKI à l'issue d'un dialogue compétitif.

4.1 Organisation du marché

Le marché concerne un ensemble d'activités en lien avec le sous-système dont le périmètre est le suivant :

- Etudes de conception ;
- Fourniture des équipements ;
- Fabrication ;
- Transport sur site ;
- Montage et mise en service ;
- Documentation et formation du personnel d'exploitation ;
- Assistance à l'exploitation pendant les cinq premières années.

Sur la base du planning objectif du projet Cigéo en vigueur, le marché de conception/réalisation couvre la période de 2014 à 2029 avec un montage contractuel flexible et adapté aux échéances du projet, organisé autour :

- D'une tranche ferme pour les missions d'avant-projet sommaire et définitif (APS/APD), ainsi que pour les missions de dossiers réglementaires (DAC et autres) ;
- D'une tranche conditionnelle n°1 (TC1) pour la reprise d'APD, les études d'exécution et les essais de qualification ;
- D'une tranche conditionnelle n°2 (TC2) pour les approvisionnements, la fabrication, le montage et les essais usine, l'emballage et le stockage, et la documentation ;
- D'une tranche conditionnelle n°3 (TC3) pour l'expédition, les travaux de montage et les essais sur site, la documentation et les formations ;
- D'une tranche optionnelle n°1 pour la réalisation de dossiers techniques relatifs à la reprise d'APD et aux différentes revues du projet ;
- D'une tranche optionnelle n°2 pour une assistance à l'exploitation et aux contrôles ;
- D'une tranche optionnelle n°3 pour la maintenance pendant les 5 premières années d'exploitation.

4.2 Périmètre et limites de prestations

Dans le but de présenter dans cette note tous les coûts relatifs à un même sous-système, l'intégralité des montants retenus pour le chiffrage sont affichés. Certains coûts sont donnés à titre indicatif, ils sont rassemblés et analysés dans une note spécifique dédiée. Il s'agit en particulier :

- Des coûts de MOe, de MOA et d'AMO réglementaires en tranche 1 ;
- Des coûts de pièces de rechange.

Sont inclus dans cette estimation :

- Les coûts de fabrication et de montage du funiculaire en tranche 1 ;
- Le démantèlement en fin de vie ;
- La Jouvence des composants : renouvellement à l'identique des équipements à l'issue de leur durée de vie.

Les coûts présentés comprennent :

- Les études fournisseurs ;
- Les fournitures et approvisionnements ;
- La préfabrication ;
- L'emballage et le transport sur site ;
- Le montage (en usine et sur site) ;
- Les essais (en usine et sur site) ;
- Les premières dotations de pièces de rechange (5 premières années).

Sont exclus de cette estimation :

- Les coûts de maîtrise d'œuvre de conception en tranche 1 ;
- Les coûts de maîtrise d'ouvrage en tranche 1 ;
- Les coûts associés aux organismes de contrôles réglementaires (AMO réglementaires) en tranche 1 ;
- Les aléas de réalisation ;
- Les assurances, les impôts et taxes.

4.3 Investissement de la tranche 1

Le tableau ci-dessous synthétise la décomposition des coûts d'investissement de la tranche 1 aux conditions économiques de 2012.

Fonctions / Métiers	Total	
<i>Machinerie</i>	5 M€	
<i>Dispositif de tension</i>	1 M€	
<i>Gare amont</i>	1 M€	
<i>Gare aval (y/c zone de sécurité)</i>	1 M€	
<i>Ensemble de renvoi</i>	0 M€	
<i>Véhicule(s)</i>	5 M€	
<i>Voie</i>	5 M€	
<i>Zone de maintenance</i>	0 M€	
<i>Outillages et moyens spéciaux</i>	2 M€	
Total fonctions	20 M€	
<i>Etudes d'EXE et essais de qualification</i>	13 M€	
<i>Prestations en usine</i>	2 M€	
<i>Montage et essais sur site</i>	12 M€	
Total M&T (yc frais transverses)	48 M€	
<i>MOe de conception</i>		cf. note MOe/MOA
<i>MOe de réalisation</i>	5 M€	
Total MOe	5 M€	
<i>AMO Réglementaires</i>		cf. note MOe/MOA
<i>MOA</i>		cf. note MOe/MOA
Total MOA		
Total	52 M€	

Tableau 3 – Tableau de synthèse des coûts d'investissement

Autres tranches du marché :

- La tranche ferme (APS/APD et dossiers réglementaires) et la tranche optionnelle n°1 sont intégrées dans le PMT et font l'objet d'un chiffrage spécifique dans la note MOe/MOA. Elles s'élèvent en euros courants (2014) à :
 - ✓ Tranche ferme : 11 257 206,5 € (environ 11,0 M€ aux CE₂₀₁₂) ;
 - ✓ Tranche optionnelle n°1 : 534 869,5 € (environ 524 k€ aux CE₂₀₁₂).

- Les tranches optionnelles n° 2 et n° 3 qui ne font pas partie du coût d'investissement mais du coût d'exploitation, sont rappelées ici à titre informatif et s'élèvent en euros courants 2014 à :
 - ✓ Option n°2 - Assistance à l'exploitation et aux contrôles : 1 312 929,00 € ;
 - ✓ Option n°3 - Maintenance pendant les 5 premières années d'exploitation : 3 363 005,10 €.

4.4 Jouvence

Le tableau ci-dessous synthétise la décomposition des coûts de jouvence aux conditions économiques de 2012.

Postes	Total
<i>Dépose et évacuation ancien funiculaire</i>	3.7 M€
<i>Etudes d'exécution</i>	2.6 M€
<i>Appro. / Fab. / Montage en usine</i>	22.3 M€
<i>Montage et essais sur site</i>	12.4 M€
Total M&T (y/c frais transverses)	41 M€
<i>MOe de conception</i>	0.8 M€
<i>MOe de réalisation</i>	4.1 M€
Total MOe	5 M€
<i>AMO Réglementaires</i>	0.2 M€
<i>MOA</i>	1.2 M€
Total MOA	1 M€
Total	47 M€

Tableau 4 - Tableau de synthèse des coûts de jouvence

L'écart entre les chiffrages 2013 et 2014 sur le poste « MOe de réalisation », provient d'une erreur sur le taux appliqué (10% au lieu de 20%). Le présent chiffrage tient compte de cette correction.

4.5 Démantèlement

Le tableau ci-dessous synthétise la décomposition des coûts de démantèlement aux conditions économiques de 2012.

<i>M&T investissement (pour mémoire)</i>	37.3 M€
M&T démantèlement	3.7 M€
<i>MOe de conception</i>	0.07 M€
<i>MOe de réalisation</i>	0.37 M€
Total MOe	0.4 M€
<i>AMO Réglementaires</i>	0.02 M€
<i>MOA</i>	0.11 M€
Total MOA	0.1 M€
Total	4.3 M€

Tableau 5 - Tableau de synthèse des coûts de démantèlement

4.6 Pièces de rechange

Le tableau ci-dessous synthétise la décomposition des coûts de pièces de rechange aux conditions économiques de 2012.

	Assiette PdR	Coût
M&T	16.7 M€	9.3 M€

Tableau 6 - Tableau de synthèse des coûts de pièces de rechange

4.7 Synthèse des investissements

Le tableau ci-dessous synthétise l'ensemble des investissements présentés aux conditions économiques de janvier 2012.

	T1	Tu	Jouvence	Déman- tèment	Total
Total M&T	47.7 M€	0.0 M€	41.0 M€	3.7 M€	92.4 M€
<i>MOe de conception</i>		0.0 M€	0.8 M€	0.1 M€	0.9 M€
<i>MOe de réalisation</i>	4.8 M€	0.0 M€	4.1 M€	0.4 M€	9.2 M€
Total MOe	4.8 M€	0.0 M€	4.9 M€	0.4 M€	10.1 M€
<i>AMO réglementaires</i>		0.0 M€	0.2 M€	0.0 M€	0.2 M€
<i>MOA</i>		0.0 M€	1.2 M€	0.1 M€	1.3 M€
Total MOA	0.0 M€	0.0 M€	1.4 M€	0.1 M€	1.6 M€
Total	52 M€	0 M€	47 M€	4 M€	104 M€

Tableau 7 - Synthèse des investissements

4.8 Analyse des écarts entre J_{esq} 05 et J_{aps} 03b

Le déroulement du dialogue compétitif a permis d'affiner les estimations de coûts des différents postes. Le coût total d'investissement a été réduit de 0.8 M€.

Investissements	(A) Jesq05 (M€)	(B) Japs03b (M€)	Ecarts (A) / (B) (M€)	Commentaires
M&T	46.2	47.7	+1.5	Ajustement des montants suite à la passation du marché et ajout de l'option 1 (0.5M€)
Sous total T1	46.2	47.7	+1.5	
Jouvence	43.1	41.0	-2.1	Ajustement des montants suite à la passation du marché
Démantèlement	3.9	3.7	-0.2	
Sous total Tu	47.0	44.7	-2.3	
TOTAL	93.2	92.4	-0.8	

Tableau 8 - Analyse des écarts

4.9 Chronique de dépenses

La chronique de dépenses fait apparaître :

- La construction entre 2022 et 2027 ;
- La jouvence en 2100 ;
- Le démantèlement entre 2145 et 2149.

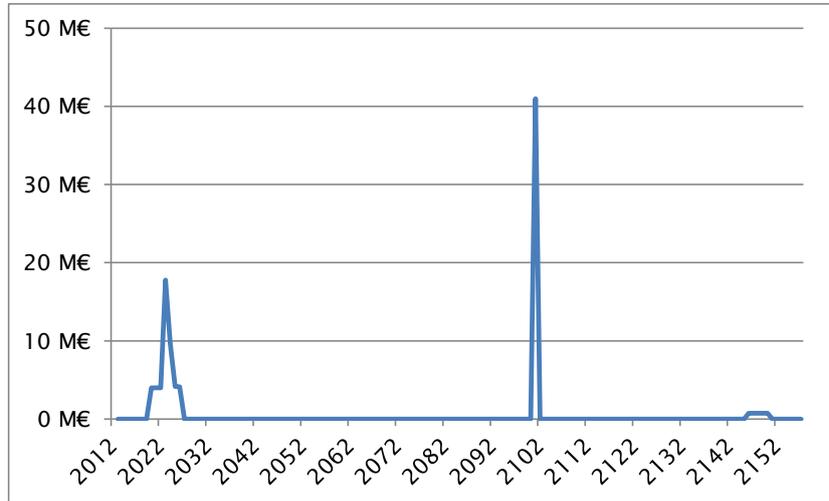


Figure 3 - Chronogramme des dépenses pour le coût d'investissement

PLAN DE DÉVELOPPEMENT DES COMPOSANTS DU PROJET CIGÉO

Déclinaison suivant l'échelle TRL (ISO 16290:2013)

Identification

CG.PDD.ADPG.14.0031

Octobre 2014

Pages : **89**

SOMMAIRE

1.	Contexte et objet	6
2.	Données d'entrée	7
2.1	<i>Exigences applicables</i>	7
2.2	<i>Programme industriel de gestion des déchets</i>	7
2.3	<i>Le site de Meuse/Haute-Marne</i>	8
2.4	<i>Etat d'avancement du projet</i>	8
2.4.1	Etudes de conception industrielle	8
2.4.2	Evaluation des performances	8
3.	Objectifs du projet, utilisation de l'échelle TRL	8
3.1	<i>Présentation de l'échelle TRL</i>	8
3.2	<i>Application de l'échelle TRL à Cigéo</i>	10
3.3	<i>Objectifs généraux du projet Cigéo</i>	11
3.4	<i>Phasage du projet</i>	12
4.	Quartier, tunnels et conteneurs de stockage de déchets MAVL	16
4.1	<i>Solutions techniques étudiées</i>	16
4.2	<i>Fonctions et exigences</i>	17
4.2.1	Fonctions de sûreté après fermeture	17
4.2.2	Stocker les colis de déchets et permettre leur retrait (phase d'exploitation)	18
4.2.3	Fonctions de sûreté et réduction des risques en exploitation	19
4.3	<i>Conteneurs de stockage</i>	21
4.3.1	Etat des lieux	21
4.3.2	Démonstration en environnement représentatif de la durabilité et de la fonction de protection thermique du conteneur (2014-2017 ; TRL 6)	21
4.3.3	Démonstration en environnement opérationnel des performances du conteneur (2018-2024 ; TRL 7)	23
4.3.4	Qualification et mise en œuvre (2021-2035 ; TRL 8, TRL 9)	24
4.4	<i>Tunnel de stockage</i>	27
4.4.1	Etat des lieux (TRL 5)	27
4.4.2	Conception détaillée, démonstration en environnement représentatif de la construction, de la maîtrise de l'EDZ et de la durabilité du tunnel de stockage (2014-2017 ; TRL 6)	28
4.5	<i>Quartier de stockage</i>	36
4.5.1	Etat des lieux (TRL 5)	36
4.5.2	Conception de quartier MAVL, démonstration de performance en environnement représentatif (2014-2017 ; TRL 6)	37
4.5.3	Démonstration de la performance du quartier en environnement opérationnel (2017-2024 ; TRL 7)	41
4.5.4	Qualification et mise en œuvre (TRL 8, TRL 9)	41
4.6	<i>Moyens d'exploitation</i>	44
4.6.1	Moyens de mise en place et retrait des colis de déchets dans les alvéoles	44
4.6.2	Moyens de surveillance	45
4.6.3	Autres moyens techniques d'exploitation de quartier MAVL au niveau 2 de récupérabilité	46
4.6.4	Moyens techniques spécifiques au niveau 3 de récupérabilité	47

5. Quartiers, micro-tunnels et conteneurs de stockage de déchets HA	49
5.1 Solutions techniques étudiées	49
5.2 Fonctions et exigences	50
5.2.1 Fonctions après-fermeture	50
5.2.2 Fonctions et exigences en exploitation	51
5.3 Conteneur de stockage	52
5.3.1 Etat des lieux (TRL 5)	52
5.3.2 Démonstration en environnement représentatif de la durabilité de l'étanchéité du conteneur (2014-2017 ; TRL 6)	53
5.3.3 Démonstration en environnement opérationnel des performances du conteneur (2018-2024 ; TRL 7)	55
5.3.4 Qualification et mise en œuvre (2021-2035 ; TRL 8, TRL 9)	55
5.3.5 Recherche et développement sur des matériaux alternatifs de conteneur	56
5.4 Micro-tunnel de stockage	58
5.4.1 Etat des lieux (TRL 5)	58
5.4.2 Evaluation en environnement représentatif de la performance mécanique du chemisage, études et recherches menées sur la période 2014-2017 (TRL 6)	58
5.4.3 Démonstration en environnement opérationnel (2017-2024, TRL 7)	60
5.4.4 Qualification et mise en œuvre industrielle (2025-..., TRL 8, TRL 9)	61
5.5 Quartier de stockage	64
5.5.1 Etat des lieux (TRL 5)	64
5.5.2 Conception des quartiers HA, évaluation de leur fonctionnement thermo-hydro-mécanique (TRL 6)	64
5.5.3 Démonstration sur modèles représentatifs (2017-2024, TRL 7)	66
5.5.4 Mise en œuvre du quartier HA0 de Cigéo (2025-..., TRL 8, TRL 9)	66
5.6 Moyens d'exploitation	69
5.6.1 Moyens de mise en place et retrait des colis de stockage	69
5.6.2 Moyens de surveillance	70
5.6.3 Moyens de gestion des fluides dans les alvéoles, ventilation des galeries d'accès	70
5.6.4 Moyens de protection contre l'exposition au rayonnement	70
6. Liaisons surface-fond et galeries de liaison	72
6.1 Solutions techniques étudiées	72
6.2 Fonctions et exigences	72
6.3 Liaisons surface-fond	73
6.4 Galeries de liaison, ouvrages souterrains de soutien logistique	74
6.4.1 Etat des lieux	74
6.4.2 Conception, démonstration de performance en environnement représentatif (2014-2017/2018 ; TRL 6)	75
6.4.3 Démonstration des performances en environnement opérationnel (2018-2024 ; TRL 7)	76
6.4.4 Qualification et mise en œuvre (TRL 8, TRL 9)	76
6.5 Moyens de transfert de colis de déchets	78
6.5.1 Etat des lieux	78
6.5.2 Conception (2014-2017/2018 ; TRL 6)	78
6.5.3 Démonstration des performances en environnement opérationnel (2018-2024 ; TRL 7)	78
6.5.4 Qualification et mise en œuvre (TRL 8, TRL 9)	78
7. Ouvrages de fermeture	81

7.1	<i>Scellements</i>	81
7.1.1	Solutions techniques étudiées	81
7.1.2	Fonctions et exigences	82
7.1.3	Etat des lieux (TRL 5)	83
7.1.4	Evaluation en environnement représentatif des performances hydrauliques et mécaniques des scellements (TRL 6), préparation des démonstrateurs de Cigéo	84
7.1.5	Démonstration en environnement opérationnel, qualification de la définition et des procédés de réalisation des scellements (2021-2035 ; TR 7/8)	86
7.2	<i>Autres ouvrages de fermeture</i>	89
8.	Références	89

1. Contexte et objet

La loi de programme n° 2006-739 du 28 juin 2006 relative à la gestion durable des matières et des déchets radioactifs dispose¹ que « *après entreposage, les déchets radioactifs ultimes² ne pouvant pour des raisons de sûreté nucléaire ou de radioprotection être stockés en surface ou à faible profondeur font l'objet d'un stockage en couche géologique profonde* ». Elle prévoit que « *les études et recherches correspondantes sont conduites en vue de choisir un site et de concevoir un centre de stockage de sorte que, au vu des résultats des études conduites, la demande de son autorisation prévue à l'article L. 542-10-1 du code de l'environnement puisse être instruite en 2015 et, sous réserve de cette autorisation, le centre mis en exploitation en 2025* ». Elle confie à l'Andra la responsabilité « *de concevoir, d'implanter, de réaliser et d'assurer la gestion (...) des centres de stockage de déchets radioactifs* » [1].

Après une vingtaine d'années d'études et de recherches ayant permis d'évaluer la faisabilité scientifique et technique du stockage des déchets HA et MAVL dans la couche d'argilites du Callovo-Oxfordien étudiée au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne, l'Andra a lancé en 2010 une phase d'études visant à élaborer un avant-projet du Centre industriel de stockage géologique « Cigéo ». Pour cela l'Andra a retenu en janvier 2012 une maîtrise d'œuvre « système » pour les études d'esquisse des installations, puis lui a adjoint en 2013 des maîtrises d'œuvre « sous-système » pour mener les études d'avant-projet (à l'exception de la conception des conteneurs de stockage qui continuera à relever de l'Andra durant la phase d'avant-projet).

Un débat public sur le projet Cigéo a été organisé par la Commission nationale du débat public (CNDP) du 15 mai au 31 juillet 2013 et du 1^{er} septembre au 15 décembre 2013 (³). En tant que maître d'ouvrage du projet Cigéo, l'Andra a présenté dans ce cadre l'inventaire prévisionnel des déchets à stocker qui a été retenu par les producteurs de déchets, les propositions de localisation des installations de Cigéo découlant des études de l'Andra et d'une concertation avec les acteurs locaux, un ensemble de propositions de l'Andra en matière de réversibilité, les résultats des études d'esquisse. Le compte rendu et le bilan du débat public ont été publiés le 12 février 2014, ainsi que l'avis du panel de citoyens ressortant de la Conférence de citoyens organisée par la CNDP.

Suite à ce débat, le Conseil d'administration de l'Andra a décidé de poursuivre le projet Cigéo dans la continuité de l'approche par étapes initiée par la loi du 30 décembre 1991. Les suites données par l'Andra au débat public sont intégrées au déroulement à venir du projet Cigéo. Elles comprennent notamment une phase industrielle pilote d'abord avec des essais de démarrage, puis avec une montée progressive en capacité opérationnelle, jusqu'à une décision de passage en exploitation courante prise sur la base d'un bilan de la phase industrielle pilote.

En complément aux études d'ingénierie confiées aux maîtrises d'œuvre, l'Andra poursuit ses études propres, essais et recherches pour préciser des options de conception, évaluer les propositions techniques des maîtrises d'œuvre, mettre au point des techniques de réalisation, acquérir des éléments complémentaires de justification et de démonstration et préparer les dossiers de demande d'autorisation de Cigéo.

Outre une forte implication des parties prenantes, le projet se caractérise par une construction réalisée de manière progressive et une temporalité longue que cela soit en exploitation et après fermeture du stockage. Cela concerne en particulier :

- les études et recherches rendues nécessaires par le caractère innovant de l'installation nucléaire souterraine, qui diffère notablement des installations nucléaires classiques, par exemple par la géométrie, la prise en compte d'interactions sur de grandes échelles de temps

¹ Articles L. 542-1 et suivants du Code de l'Environnement

² Les déchets radioactifs ultimes sont définis comme des déchets radioactifs « *qui ne peuvent plus être traités dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de leur part valorisable ou par réduction de leur caractère polluant ou dangereux* » (Article L542-1-1 du Code de l'environnement).

³ Le débat a donné lieu à plus de 76 000 visites sur son site internet, 1 508 questions, 497 avis, 154 « cahiers d'acteurs », 24 contributions plus détaillées, 5 délibérations d'assemblées locales.

entre des matériaux ouvragés (colis, soutènements...) et le milieu géologique dans lequel est construite l'installation. Les études et recherches ont été initiées par la loi du 30 décembre 1991 ; elles préparent aujourd'hui les étapes d'autorisation de création puis de mise en service de Cigéo ;

- la construction et l'exploitation des quartiers et ouvrages de stockage, qui se dérouleront sur une durée séculaire, par tranches successives. Des études et recherches se poursuivront au-delà de la phase industrielle pilote et du démarrage de la phase d'exploitation courante. Elles serviront à la construction des nouveaux ouvrages au cours de l'exploitation dans une optique continue d'optimisation de la conception et d'amélioration des dispositions prises pour la protection des intérêts visés au sens de l'arrêté du 7 février 2012, en cherchant les meilleures techniques disponibles en tenant compte des conditions économiques ;
- les performances attendues notamment en matière de sûreté après fermeture de l'installation, qui concernent de grandes échelles de temps (en pratique l'évaluation de sûreté après fermeture est menée jusqu'au million d'années).

Cette temporalité et le caractère innovant du stockage géologique profond impliquent une progressivité et une adaptabilité tant du programme dans son ensemble que de la conception et de la réalisation des futures installations de Cigéo.

Le présent document décrit les travaux prévus par l'Andra pour concevoir et démontrer les performances des ouvrages de stockage (conteneurs, alvéoles, quartiers), de liaison et de fermeture.

Il considère à la fois les concepts techniques pris en référence au stade actuel du projet et les pistes d'optimisation.

2. Données d'entrée

2.1 Exigences applicables

Pour le lancement des études visant à élaborer un avant-projet de Cigéo, l'Andra a consolidé sous la forme d'exigences applicables au projet [5] :

- les exigences issues des textes réglementaires, des guides de sûreté directement applicables à Cigéo (cas du guide de sûreté ASN 2008) et de référentiels bâtis par l'Andra en adaptant les textes et pratiques non directement applicables à Cigéo (cas du référentiel incendie), des besoins et recommandations exprimés par les clients et parties prenantes du projet (Etat, producteurs de déchets, évaluateurs, acteurs locaux) ainsi que la demande sociale et politique de réversibilité,
- les résultats des études et recherches menées depuis 1991 ; il s'est agi notamment de traduire les objectifs de sûreté sur le long terme en options de conception constituant des données d'entrée pour les études confiées aux maîtrises d'œuvre et pour les essais technologiques.

2.2 Programme industriel de gestion des déchets

L'inventaire des colis de déchets à prendre en compte dans le projet est fixé par les producteurs de déchets en liaison avec l'Andra, sans préjudice de l'acceptation ultérieure de ces colis. Les producteurs fixent également les hypothèses à retenir concernant les modalités techniques (définition du colis livré, emballages de transport...) et le planning de livraison. L'ensemble de ces données sont rassemblées dans le programme industriel de gestion des déchets [2]. Celui-ci est mis à jour régulièrement, les évolutions étant intégrées au démarrage de chaque phase du projet. Le risque associé à ces évolutions est réduit par la flexibilité attendue de la conception de Cigéo [5].

Les exigences applicables au projet prévoient la possibilité d'itérations pour optimiser les modalités de livraison en tenant compte de l'évaluation des capacités opérationnelles offertes par les installations de Cigéo. Ce type d'optimisation s'inscrit dans une approche globale de l'ensemble du système industriel de gestion des déchets HA et MAVL comprenant, outre Cigéo, les installations et activités industrielles en amont : conditionnement, entreposage, transports, stockage.

Il est à noter des possibilités d'évolution à moyen ou long terme, d'une part en lien avec le déroulement du projet FAVL (l'inventaire des déchets qui pourront être stockés à faible profondeur n'est pas figé à ce stade car dépendant des performances du site), d'autre part avec la possibilité que certaines matières soient requalifiées en déchets et ne puissent, pour des raisons de sûreté et de radioprotection, être stockées en surface ou à faible profondeur.

2.3 Le site de Meuse/Haute-Marne

Le site de Meuse/Haute-Marne a fait l'objet d'investigations intensives depuis 1994, qui ont permis d'en acquérir une connaissance détaillée, à l'échelle du Laboratoire souterrain, de la zone de transposition et régionale. Les données acquises *in situ* sont interprétées de manière à construire des modèles intégrant la variabilité géologique et les incertitudes. L'ensemble des connaissances sont regroupées dans le « référentiel du site de Meuse/Haute-Marne » [3].

2.4 Etat d'avancement du projet

2.4.1 Etudes de conception industrielle

Une esquisse industrielle de l'ensemble des installations du projet Cigéo a été établie par la maîtrise d'œuvre système, correspondant aux hypothèses d'inventaire et d'ordonnement des livraisons de colis de déchets du PIGD. Parallèlement, l'Andra a élaboré une définition préliminaire des conteneurs de stockage pour l'ensemble des colis de déchets inventoriés. A la suite d'une analyse de la valeur et d'études d'optimisations menées à partir de l'esquisse, l'Andra a effectué des choix structurants d'options de conception mi 2014 intégrés à l'avant-projet sommaire des installations.

Un ensemble de voies d'opportunités ont été identifiées pour la suite du projet. Certaines relèvent intégralement des études des maîtrises d'œuvre, d'autres nécessitent également une instruction scientifique et technique par l'Andra.

2.4.2 Evaluation des performances

La faisabilité « scientifique » du projet a été démontrée en 2005, particulièrement pour ce qui concerne la sûreté après fermeture. Cette faisabilité de principe du stockage concernait également la réversibilité, que les appréciations des évaluateurs ont conduit à considérer comme atteignable sur une durée d'au moins 100 ans. En 2009, les options de conception, de sûreté et de réversibilité présentées par l'Andra ont notamment permis de compléter la démonstration de la faisabilité de principe sous l'angle de la sûreté durant la période d'exploitation. La faisabilité « industrielle » du projet a été confirmée dans le cadre de la « revue critique de faisabilité » (2013) qui a permis à l'Andra d'engager la phase d'avant-projet.

3. Objectifs du projet, utilisation de l'échelle TRL

L'Andra a choisi d'utiliser l'échelle internationale TRL comme outil indicatif d'appréciation de la progression technique du projet Cigéo et de ses diverses composantes. Après une présentation de l'échelle TRL et de ses modalités d'application à Cigéo, ce chapitre décrit les objectifs généraux du projet en regard de l'échelle TRL. Il est important de noter que le phasage du projet et ses jalons décisionnels et d'autorisation ne sont pas directement conditionnés aux niveaux TRL.

3.1 Présentation de l'échelle TRL

L'échelle internationale TRL (Technology Readiness Level) permet de quantifier le niveau de maturité technologique atteint par un élément (matériel, composant, système...). Elle fait l'objet de la norme ISO 16290:2013 [7]. Développée principalement pour les systèmes spatiaux⁴, elle peut être transposée à un domaine plus large, notamment pour évaluer l'état de maturité technique d'un projet ou pour mesurer la progression d'une technologie tout au long de son développement.

⁴ L'échelle TRL a été initialement proposée par la NASA et l'ESA.

L'échelle TRL comporte neuf niveaux. Le niveau le plus bas (niveau 1) correspond à la découverte et à la compréhension, dans le cadre de la recherche académique, d'un phénomène physique présentant des applications potentielles (par exemple, la découverte de la radioactivité par Henri Becquerel en 1896). Un élément atteint le plus haut niveau (niveau 9) lorsqu'il est complètement défini par un ensemble de procédés reproductibles incluant sa fabrication, ses tests et son exploitation et qu'il satisfait les exigences de performance qui lui sont assignées dans l'environnement opérationnel réel (par exemple le stockage de déchets radioactifs en surface pratiqué au CSA). L'atteinte du TRL 5 signifie que la faisabilité de l'élément a été démontrée dans un environnement représentatif.

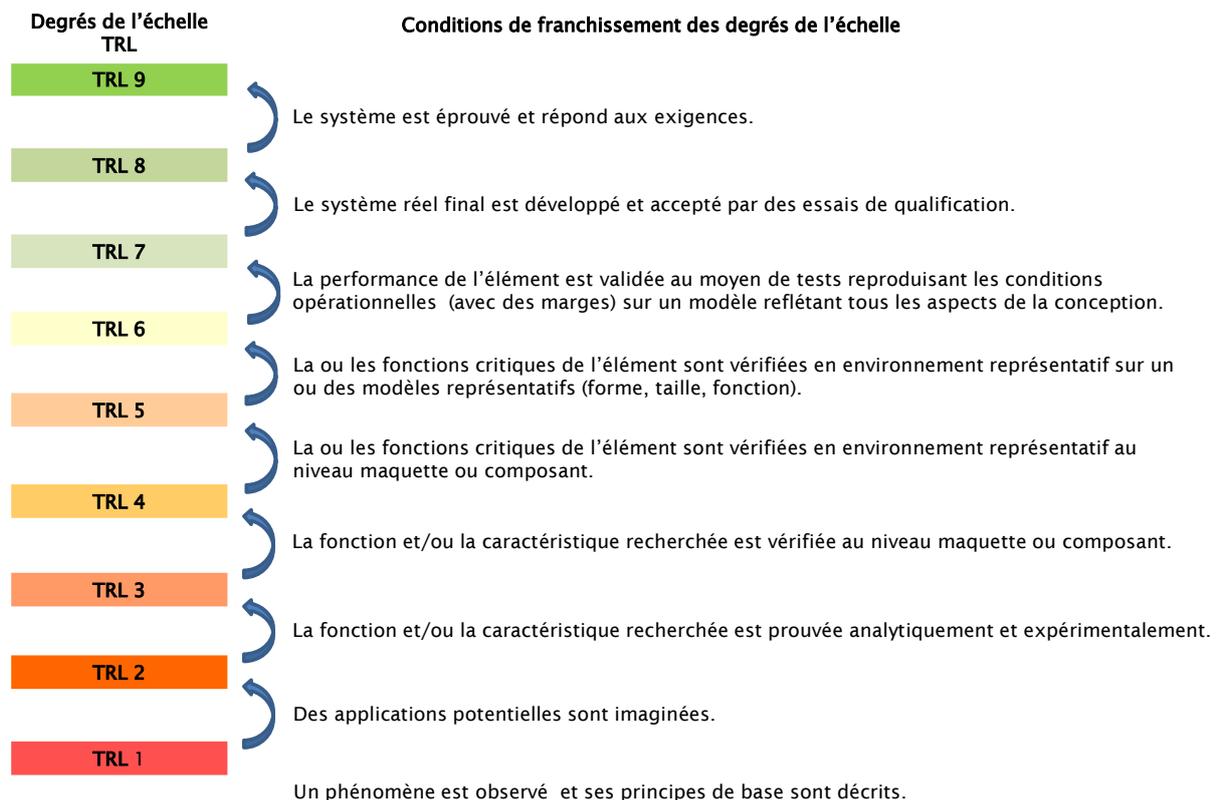


Figure 3.1-1 Schéma illustrant les niveaux de l'échelle TRL

Une condition préalable à l'utilisation de l'échelle TRL est l'identification de l'élément soumis à l'évaluation. L'échelle TRL complète s'applique à cet élément ; il n'y a pas d'augmentation de la complexité de l'élément (ajout de parties physiques ou de fonctions) lorsqu'il passe des niveaux les plus bas de l'échelle au niveau les plus hauts. Certains éléments peuvent être subdivisés en sous-éléments auxquels l'échelle s'applique aussi individuellement. Le niveau d'un élément dans l'échelle TRL ne peut pas être supérieur aux niveaux des sous-éléments qui le constituent.

Pour un élément appartenant aux niveaux bas de l'échelle TRL, les exigences de performance sont préliminaires. Elles sont progressivement affinées et vérifiées au fur et à mesure du passage aux niveaux supérieurs. Les niveaux de l'échelle les plus élevés impliquent que les exigences de performance et l'environnement opérationnel sont connus et que l'élément est dans sa forme finale, intégré dans le système auquel il appartient pour validation ou utilisation. L'environnement opérationnel de l'élément est l'ensemble des conditions constituant une contrainte, de la conception, jusqu'à l'utilisation de l'élément. Il s'agit par exemple des conditions naturelles (climat, poussière, terrain...) et des conditions dites « induites » (température, vibrations, irradiations, interférences électromagnétiques...).

Un élément possède des fonctions pour lesquelles il est produit. Ces fonctions sont considérées comme des fonctions « critiques » si elles exigent une vérification spécifique de leur technologie. C'est le cas pour des éléments nouveaux qui ne peuvent pas être évalués sur la base de réalisations

antérieures ou pour des éléments éprouvés qui sont utilisés dans des conditions nouvelles ou pour des usages nouveaux.

Une évaluation TRL est valable à un moment donné et pour un élément donné. En particulier, un élément peut être rétrogradé dès lors qu'il est utilisé dans un système différent ou dans un environnement différent ou pour toute raison qui font que les conditions ayant prévalu lors de la première analyse ne sont plus valables.

L'échelle TRL ne fournit pas d'indication sur le degré d'efforts nécessaire pour passer d'un niveau à un autre. L'expérience montre que ceux-ci varient en fonction de l'élément considéré et du type de mission.

3.2 Application de l'échelle TRL à Cigéo

L'échelle TRL peut être appliquée à l'élément Cigéo dans son ensemble, comme elle peut également être appliquée à un élément constituant une sous-partie de Cigéo, par exemple le conteneur de stockage (Tableau 3.3-1, page 12).

Le niveau de Cigéo dans l'échelle TRL ne peut pas être supérieur aux niveaux des éléments qui le constituent. Toutefois, compte tenu de la durée d'exploitation de Cigéo (durée d'ordre séculaire) et de sa construction progressive (phase industrielle pilote puis mise en exploitation courante par tranches d'alvéoles successives), les éléments de Cigéo dont la mise en service est envisagée au démarrage peuvent être à des niveaux de maturité plus élevés que ceux non nécessaires au démarrage et pendant la première phase qui seront mis en service dans une phase ultérieure. Le TRL d'un élément appartenant à la solution de référence différera de celui d'un élément appartenant à une piste d'optimisation qui pourrait être intégrée au projet à plus ou moins longue échéance.

L'environnement opérationnel de Cigéo, c'est-à-dire les conditions pour lesquelles les éléments doivent être conçus et dans lesquelles ils rempliront leurs fonctions est singulier pour une INB. Certains systèmes largement utilisés dans l'industrie nucléaire « classique », par exemple les systèmes de ventilation, de manutention ou de surveillance, devront être adaptés pour une utilisation en souterrain sur une durée d'exploitation d'ordre séculaire. La durée de la phase d'exploitation et l'impossibilité d'effectuer des opérations de maintenance à l'intérieur des alvéoles de stockage constituent également une singularité. De plus, les fonctions de certains éléments (cas des chemisages alvéoles HA) devront être maintenues après-fermeture et dans des conditions évolutives (absence d'eau, puis resaturation ; modification des conditions redox...) afin que l'objectif fondamental de sûreté passive du stockage après fermeture puisse être atteint.

L'utilisation de l'échelle TRL pour l'évaluation du niveau de maturité technologique de Cigéo et des éléments qui le composent devra tenir compte de cet environnement opérationnel particulier et de ces successions de situations. Les essais auxquels les éléments seront soumis afin d'évaluer leurs performances devront également intégrer ces spécificités. Par exemple, il n'est *a priori* pas possible de réaliser un essai reproduisant exactement les conditions d'évolution d'un colis industriel, irradiant, vieilli sur plusieurs centaines d'années, dans l'environnement souterrain du stockage. Aussi, des tests et des simulations permettant d'évaluer en particulier la robustesse et la durabilité des éléments dans les différentes successions de situations que rencontreront les colis devront être mis en œuvre.

A ce stade, Cigéo dans son ensemble a atteint le TRL 5 (faisabilité démontrée) pour les solutions techniques de référence.

Au final, pour les éléments réalisant des fonctions critiques après fermeture (surconteneur, scellements...) l'atteinte du TRL 9 sera conditionnée par :

- La vérification, dans le cadre de leur première mise en œuvre industrielle dans Cigéo en conditions réelles, du respect des exigences techniques spécifiées,
- La démonstration de la satisfaction par Cigéo des objectifs de performances après fermeture sur la base des exigences spécifiées, en s'appuyant notamment sur des simulations.

3.3 Objectifs généraux du projet Cigéo

Les objectifs du projet Cigéo sont :

- obtenir l'autorisation de mettre en service de premiers alvéoles MAVL et HA (déchets moyennement exothermiques) et l'ensemble du procédé d'exploitation (TRL 8), de la solution de référence ;
- stocker des colis de déchets MAVL et HA représentatifs de l'inventaire ;
- présenter, dans le cadre du bilan de la phase industrielle pilote :
 - o la démonstration du bon fonctionnement de Cigéo en conditions opérationnelles réelles (TRL 9), au niveau 2 de l'échelle AEN de récupérabilité [6] : performance des équipements industriels, maîtrise des risques en exploitation, capacité à retirer des colis de déchets, surveillance... ;
 - o la qualification des procédés HA et MAVL et des ouvrages de fermeture - par des essais et des simulations - (TRL 8),
 - o la qualification des procédés de maintien de Cigéo au niveau 3 de récupérabilité (*i.e.* en situation d'alvéoles fermés) et des procédés de retrait de colis de déchets à ce niveau (TRL 8) ;
- démontrer en environnement opérationnel la performance de pistes d'optimisation pour le stockage de déchets MAVL stockés au-delà de la phase industrielle pilote (TRL 7), afin de préparer la demande de mise en service de nouveaux alvéoles intégrant ces pistes d'optimisation ;
- démontrer en environnement représentatif la performance de pistes d'optimisation pour le futur stockage de déchets HA fortement exothermiques (TRL 6) puis initier la démonstration en environnement opérationnel.

Tableau 3.3-1 Illustration de l'Echelle TRL appliquée au conteneur de stockage HA

Echelle TRL appliquée à Cigéo Cas des surconteneurs (les fonctions critiques sont « le retard de l'arrivée d'eau sur les déchets » et « l'aptitude à la manutention horizontale »)	
Après atteinte du TRL 9	Cigéo est en exploitation industrielle courante. Les surconteneurs industriels sont reçus, soudés pour constituer les colis de stockage (CS) et stockés au rythme nominal. Des rapports d'exploitation sont émis périodiquement.
Après atteinte du TRL 8 et pour atteindre le TRL 9	Cigéo est en phase industrielle pilote. De premiers colis de déchets réels sont reçus. L'exploitant procède à des essais et à des vérifications des procédures d'exploitation en conditions actives. Des surconteneurs industriels sont reçus, soudés par le poste industriel pour constituer des CS actifs qui sont mis en stockage. Le respect des exigences techniques spécifiées est vérifié.
Après atteinte du TRL 7 et pour atteindre le TRL 8	Suite à sa construction, l'installation est en phase industrielle pilote. Son exploitant procède à des essais et à des vérifications des procédures d'exploitation dans des conditions inactives. De premiers surconteneurs industriels sont reçus, soudés par le poste industriel pour constituer des CS inactifs qui sont mis en stockage.
Après atteinte du TRL 6 et pour atteindre le TRL 7	L'installation Cigéo n'est pas encore construite. Plusieurs exemplaires identiques d'un modèle de surconteneur, ayant les mêmes caractéristiques que le surconteneur industriel prévu (taille, masse, épaisseur, forme, présence d'un objet simulant un conteneur de verre...), sont produits, assemblés et soudés par des procédés identiques à ceux qui seront industrialisés (même matériau, même technologie de soudure...); les futures conditions industrielles de production sont reproduites ou prises en compte au mieux (température, irradiation...). Les CS produits sont soumis à des caractérisations (analyse non destructives et destructives), à des essais (chute, résistance mécanique, incendie, corrosion, durabilité...) et à des modélisations, reproduisant et pour certaines dépassant les conditions opérationnelles rencontrées en exploitation et pendant plusieurs siècles après fermeture, en vue de valider leurs performances.
Après atteinte du TRL 5 et pour atteindre le TRL 6 <i>Phase en cours du projet</i>	Plusieurs exemplaires, éventuellement de différents modèles de surconteneur, ayant des caractéristiques représentatives de celles des surconteneurs industriels envisagés (forme, taille, fonction, matériau) sont produits, assemblés et soudés. Ces modèles sont soumis à des caractérisations (destructives et non destructives), tests et simulations permettant d'évaluer leurs fonctions critiques dans des conditions d'environnement représentatives du stockage (température, environnement argileux ou cimentaire, sollicitations mécaniques, conditions redox...).
Après atteinte du TRL 4 et pour atteindre le TRL 5	Des exemplaires de maquettes de surconteneurs (pas nécessairement en « grandeur nature » ou entièrement fonctionnels, mais autant que nécessaire représentatifs des surconteneurs industriels envisagés) ou de composants de surconteneur (éprouvettes, pièces entières ou parties de couvercles, corps, zones soudées, patins...) sont utilisés pour évaluer les fonctions critiques des surconteneurs industriels dans des conditions d'environnement représentatives du stockage. Ces maquettes ou composants sont soumis à des caractérisations (destructives et non destructives), tests et simulations.
Après atteinte du TRL 3 et pour atteindre le TRL 4	Un ou des exemplaires de maquettes de surconteneurs ou de composants de surconteneurs sont produits afin d'établir la performance de base. La vérification limitée à des conditions de laboratoire et par simulation est peu représentative.

3.4 Phasage du projet

La phase d'avant-projet sommaire (APS) de Cigéo se déroule jusqu'en 2015. Les options de conception fondant les études d'APS ont été fixées à mi-2014, sur la base notamment des résultats d'un ensemble d'études d'optimisation lancées au second semestre 2013.

Suite au débat public, l'Andra s'est engagée à remettre en 2015 :

- à l'Etat une proposition de plan directeur pour l'exploitation du stockage, comportant :
 - o les différentes étapes d'exploitation progressive du stockage, dont une phase industrielle et notamment le rythme et l'ordre de stockage des différents colis de déchets,

- le programme d'essais qui sera réalisé pendant la phase industrielle pilote,
 - les flexibilités prises en compte pour le futur stockage éventuel de déchets autres que ceux prévus par le décret d'autorisation (comme les combustibles usés, s'ils étaient considérés à l'avenir comme des déchets radioactifs),
 - un planning prévisionnel de scellement progressif des alvéoles de stockage et des galeries souterraines ainsi que l'échéance prévisionnelle de fermeture définitive de Cigéo, que seule une loi pourra autoriser.
- à l'Autorité de Sûreté Nucléaire un dossier d'options de sûreté, une version préliminaire des exigences techniques définies par l'Andra pour l'acceptation des colis de déchets et un dossier d'options techniques de récupérabilité, pour préparer l'instruction de la demande d'autorisation de création de Cigéo.

La phase d'avant-projet définitif est prévue de 2015 à 2017 (Figure 3.4-2).

Sur la base des résultats de cette phase, l'Andra finalise la demande d'autorisation de création fin 2017, en vue de l'obtention du décret d'autorisation de création à l'horizon 2020.

Sous réserve de l'obtention des autorisations nécessaires, l'Andra a proposé suite au débat public de retenir le calendrier prévisionnel suivant :

- à partir de 2015 : préparation des aménagements au niveau local (création d'un poste électrique, aménagements de certaines routes, embranchement ferroviaire du site, alimentation en eau...),
- 2020 : démarrage de la construction du stockage,
- 2025 : démarrage de l'installation par une phase industrielle pilote.

En complément des essais réalisés au Laboratoire souterrain, la phase industrielle pilote a notamment pour objectifs de conforter en conditions réelles :

- les mesures et dispositions techniques prises pour maîtriser les risques d'exploitation,
- la performance des équipements industriels,
- la capacité à retirer des colis de déchets stockés, dans le cadre d'essais de retrait,
- les moyens et capteurs permettant la surveillance du stockage,
- les techniques de scellement des alvéoles et des galeries, dans le cadre d'essais et de démonstrateurs de scellement.

La phase industrielle pilote comprend trois périodes :

- une première période permettant la réalisation d'essais dits « inactifs », c'est-à-dire sans radioactivité, avec des colis factices (Figure 3.4-1),
- une deuxième période pendant laquelle seront réalisés des essais de démarrage avec un petit nombre de vrais colis de déchets,
- une troisième période pendant laquelle seront stockés, de manière progressive, des colis de déchets HA et MA-VL représentatifs de l'inventaire des colis de déchets destinés à Cigéo.

Le passage à l'exploitation courante de Cigéo interviendra après l'établissement par l'Andra du bilan de la phase industrielle pilote.

Le plan directeur pour l'exploitation de Cigéo pourra être revu à l'issue de la phase industrielle pilote, en fonction du retour d'expérience, de l'évolution des connaissances ou des besoins de stockage, puis *a minima* tous les dix ans. Il prendra également en compte les études et recherches sur les opérations de gestion complémentaires au stockage qui seront poursuivies par l'Andra et les producteurs de

déchets, en vue d'une gestion optimisée des déchets radioactifs et d'une réduction de leur nocivité et volumes.

Au-delà de la première tranche de travaux nécessaire à la phase industrielle pilote, les installations de Cigéo seront réalisées par tranches successives, au fur et à mesure des besoins de l'exploitation courante, envisagée sur une durée séculaire.

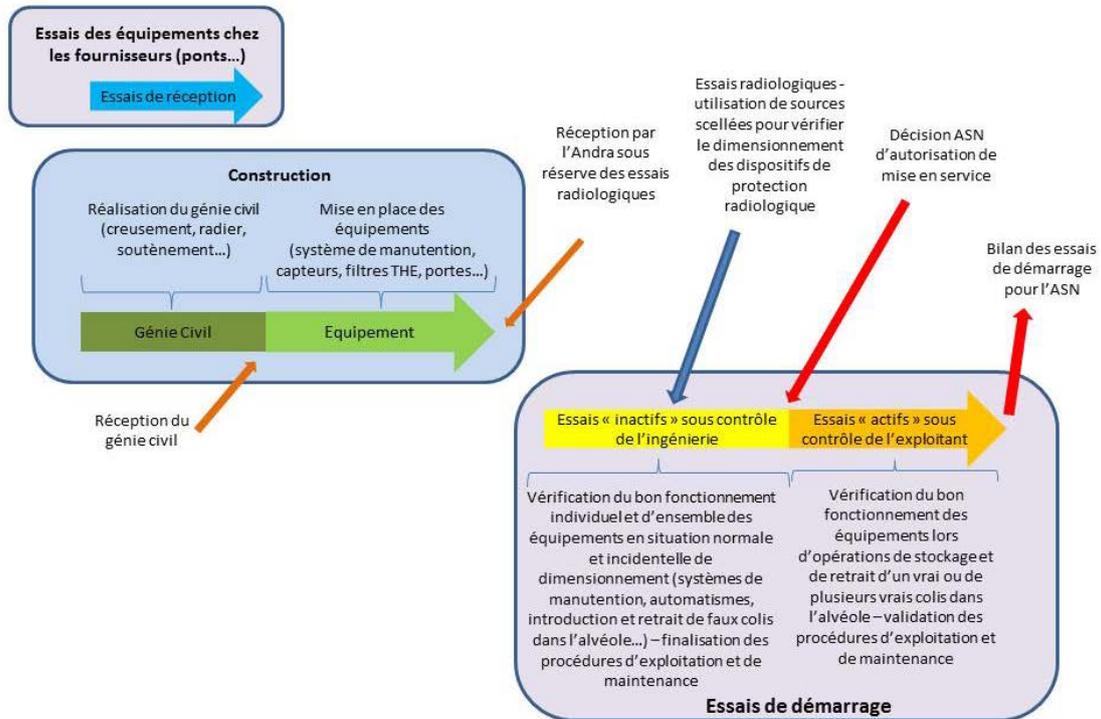


Figure 3.4-1 Articulaton des travaux de réalisation et des différents essais

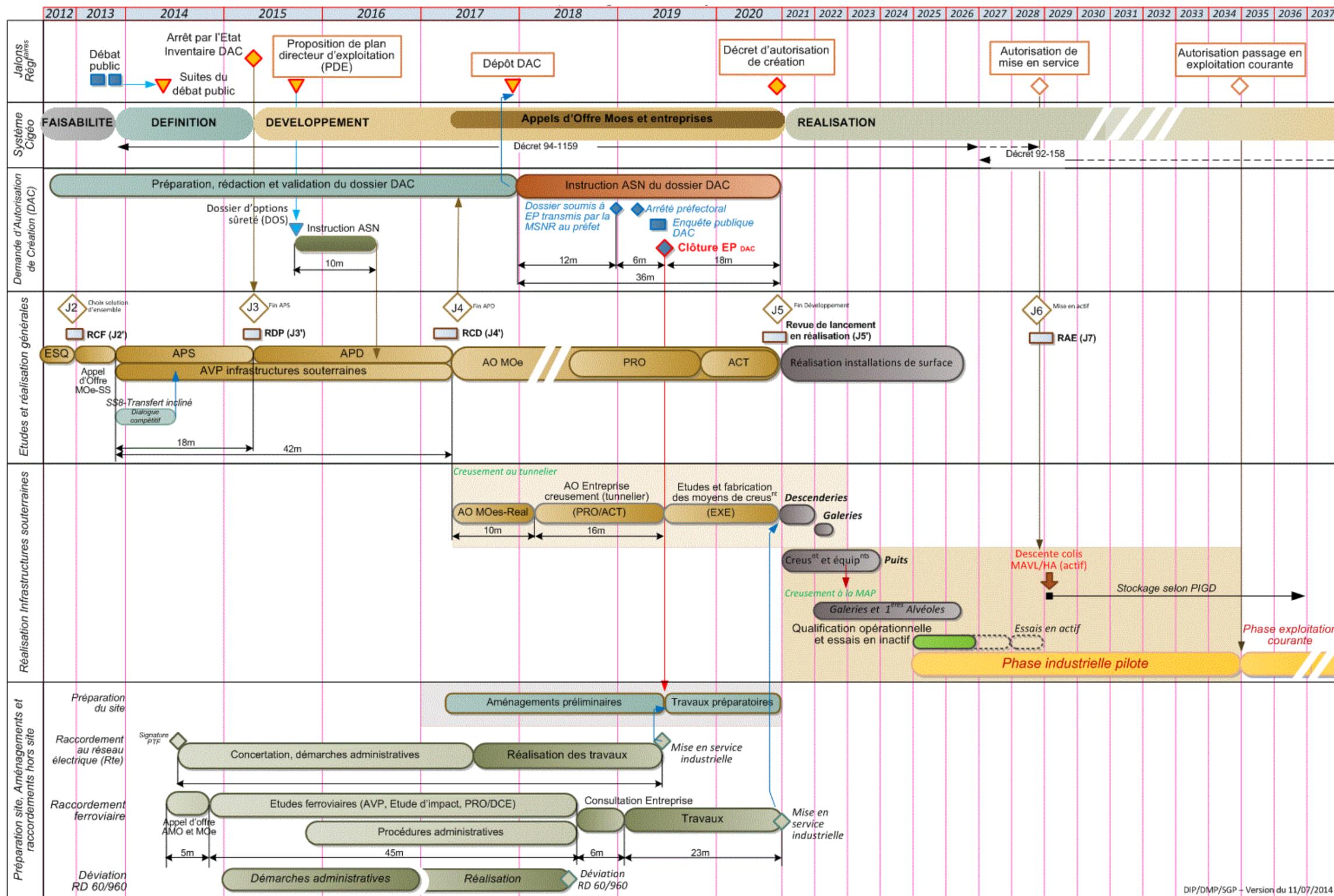


Figure 3.4-2 Planning directeur du projet Cigéo (septembre 2014)

4. Quartier, tunnels et conteneurs de stockage de déchets MAVL

Ce chapitre traite les conteneurs de stockage de déchets MAVL, dans le cas où les colis primaires ne sont pas stockés directement, les tunnels de stockage de ces déchets ainsi que l'ensemble du quartier de stockage. Un quartier comprend les tunnels de stockage et les galeries d'accès et de ventilation, et se caractérise notamment par les distances entre tunnels. Les procédés de mise en place et retrait des colis à l'intérieur du quartier et les moyens de surveillance implantés dans les tunnels et les quartiers sont également traités.

4.1 Solutions techniques étudiées

Les choix de concepts réalisés par étapes successives depuis 1991 ont conduit à retenir le stockage des colis de déchets MAVL en tunnels horizontaux de grande section implantés en partie centrale de la couche argileuse du Callovo-Oxfordien. Néanmoins, une petite partie des déchets MAVL (particulièrement des déchets vitrifiés) pourront être stockés dans des alvéoles développés pour les déchets HA.

Les tunnels de stockage constituent un volume irradiant dans lequel les colis sont manutentionnés par un équipement télé-opéré (pont gerbeur/stockeur ou chariot élévateur). Les revêtements sont réalisés en béton. Chaque tunnel est relié à l'une de ses extrémités à une galerie d'accès, par un sas de manutention, et à l'autre extrémité à une galerie de ventilation avec local de filtration pour le retour d'air (les filtres THE correspondent à la classe de confinement de niveau 2). A chaque extrémité une longueur suffisante est ménagée pour permettre d'y implanter un scellement lors de la fermeture du tunnel.

A l'issue de la phase d'esquisse, l'option de référence retenue est une section excavée des tunnels de l'ordre de 65 m² (diamètre de 9 m pour une section circulaire) et une longueur utile de 500 m environ. Sans préjudice d'évolutions ultérieures, les techniques envisagées au stade de l'esquisse sont un creusement à la machine à attaque ponctuelle (MAP), un soutènement à l'avancement à l'aide notamment de boulons radiaux, un revêtement définitif en béton réalisé de manière différée⁵.

Un passage à une section excavée d'alvéole de 115 m² (diamètre 12 m pour une section circulaire) ou une adaptation de la forme de la section, notamment une forme elliptique de grand axe horizontal, présenteraient un intérêt économique et constituent donc des voies d'opportunité. L'exploitation de tels tunnels n'est pas envisagée dans le cadre de la phase industrielle pilote mais pourrait l'être au-delà lorsque ces options auront atteint une maturité suffisante⁶. Le principe de manutention par un pont gerbeur/stockeur, retenu en entrée des études d'APS, permet le cas échéant d'augmenter le nombre de niveaux de colis gerbés sans accroître les hauteurs de chute de colis en cas d'incident.

Les études menées depuis 1991 ont recherché une certaine standardisation des colis manutentionnés en souterrain, au moyen d'un conteneur de stockage constitué d'un corps et d'un couvercle préfabriqués et assemblés par boulonnage. Sa conception en béton massif minimise les vides résiduels à l'intérieur du colis de stockage. Une géométrie parallélépipédique a été considérée pour limiter les vides résiduels externes. L'option d'un clavage, par un liant hydraulique, du couvercle et du corps est prise en compte dans les études d'APS pour tout ou partie des colis. Sa suppression est examinée comme une voie d'opportunité.

⁵ Le délai séparant le creusement et la pose du revêtement définitif diminue la charge mécanique appliquée par les argilites sur ce revêtement.

⁶ Une analyse menée sur une gamme de diamètres allant de 0,1 m à 6 m n'a pas mis en évidence d'influence de la taille de l'ouvrage sur le comportement mécanique du terrain (nature et géométrie de la fracturation, amplitude et vitesse de convergence). Cependant l'adoption d'un diamètre de l'ordre de 12 mètres suppose au préalable une validation sur des ouvrages de grande dimension représentatifs. En effet l'ASN considère « que, s'agissant de la maîtrise des risques après la fermeture du stockage, l'Andra devra compléter ses connaissances relatives à l'endommagement de la roche autour des grands ouvrages et à leur scellement. L'ASN considère nécessaire que l'Andra ait recours pour la qualification de ces ouvrages à des démonstrateurs in situ à une échelle représentative des ouvrages à réaliser. » (Avis ASN n°2011-AV-129 du 26 juillet 2011).

Le stockage direct de certaines familles de colis primaires sans conteneur de stockage constitue une piste d'optimisation pour réduire les volumes de stockage. Cela concerne les CBF-C'2, C1PG, CSD-C et plus généralement des colis primaires pour lesquels une démonstration de durabilité mécanique et de confinement sur la période d'exploitation pourra être apportée par leurs producteurs pour la totalité des colis de la famille concernée. Le principe du pont gerbeur/stockeur est compatible avec le stockage direct de certains colis. Pour d'autres, l'option du stockage direct est susceptible de modifier l'aménagement interne des tunnels (cas par exemple d'un stockage en puits pour les CSD-C). Les options techniques retenues pour le tunnel et les systèmes de mise en place et de retrait devront satisfaire les exigences en matière de sûreté en particulier avec des points de vigilance sur la maîtrise de la sûreté-criticité (cas des CSD-C en particulier), la gestion des gaz de radiolyse pendant l'exploitation et les opérations de fermeture, l'élévation de température (vis-à-vis de la tenue du béton et des équipements) et le taux de vide résiduel dans les tunnels.

4.2 Fonctions et exigences

4.2.1 Fonctions de sûreté après fermeture

Limiter le relâchement des radionucléides et toxiques chimiques et les immobiliser dans le stockage (après fermeture)

En vue de limiter l'altération de certains déchets et le relâchement consécutif de radionucléides, on privilégie l'imposition durable d'un pH basique par les bétons constitutifs des conteneurs et des tunnels de stockage ($\text{pH} > 11$ pour les déchets métalliques - particulièrement les déchets activés - ; $7 \leq \text{pH} \leq 12,5$ pour les enrobés bitumés). En ralentissant la corrosion de l'ensemble des aciers présents dans les tunnels, cette disposition est de plus favorable vis-à-vis de la production d'hydrogène gazeux après fermeture.

Par ailleurs un ensemble de contraintes s'appliquent à la conception des quartiers de stockage MAVL pour limiter la mobilité des radionucléides relâchés par les déchets :

- Les déchets MAVL constituent pour beaucoup des sources d'espèces chimiques réactives. Afin de réduire la part de radionucléides exposée aux perturbations physico-chimiques induites par les déchets eux-mêmes (espèces complexantes, transitoire redox), les familles de déchets susceptibles d'interagir au plan physico-chimique sont stockées dans des alvéoles suffisamment indépendants les uns des autres.
- On cherche aussi à limiter les quantités de composés organiques et d'espèces complexantes dans les matériaux constitutifs des conteneurs et des tunnels de stockage (adjuvantation des bétons...) de manière à éviter d'impacter la mobilité des radionucléides et des toxiques en présence.
- Enfin, le comportement des radionucléides étant sensible à la température, celle-ci est limitée dans les tunnels de stockage (70 °C au plus après la fermeture définitive).

Retarder et atténuer la migration des radionucléides et toxiques chimiques (après fermeture)

Retarder et atténuer la migration après fermeture est une fonction critique des tunnels et quartiers de stockage MAVL :

- Cette fonction repose en premier lieu sur l'épaisseur de garde d'argilites autour des quartiers de stockage (au-dessus et en-dessous), liée au niveau d'implantation des tunnels de stockage⁷ et de leurs galeries d'accès en partie médiane de la couche argileuse. L'orientation des tunnels de stockage suivant la direction de la contrainte principale majeure limite l'extension de l'EDZ dans les argilites en voûte et en radier. Les distances entre tunnels évitent des interactions mécaniques qui augmenteraient l'extension des perturbations dans les argilites.

⁷ La hauteur limitée des tunnels horizontaux dans la couche contribue à optimiser l'épaisseur de garde d'argilites.

- Afin d'éviter la propagation de désordres mécaniques dans les argilites à long terme, après perte d'intégrité des revêtements, le volume des vides résiduels dans les alvéoles après obturation est le plus faible possible, en tenant compte des contraintes techniques⁸.
- L'extension de la zone d'argilites fracturée hydrauliquement connectée autour des galeries d'accès aux tunnels de stockage, particulièrement celles orientées suivant la direction de la contrainte horizontale principale mineure, doit être limitée de façon à ne pas affecter la garde d'argilites utile.
- De plus, les alvéoles, par leur longueur, et le quartier de stockage, par sa forme, favorisent la diffusion des radionucléides et des toxiques dans le Callovo-Oxfordien plutôt qu'une migration via les galeries d'accès et de liaison.

Maintien de la sous-criticité après fermeture

Certains déchets MAVL contiennent des radionucléides fissiles en quantité significative. L'arrangement des colis de déchets dans les alvéoles et leur architecture doivent éviter une reconcentration excessive d'isotopes fissiles contenus dans les déchets de manière à rester sous-critique, en tenant compte du vieillissement et de l'évolution phénoménologique de l'alvéole à long terme.

4.2.2 Stocker les colis de déchets et permettre leur retrait (phase d'exploitation)

Transfert des colis de stockage jusqu'à leur emplacement de stockage, capacité à retirer des colis de stockage et les transférer vers d'autres alvéoles de stockage ou en surface, capacité à ré-ouvrir un tunnel fermé

Le conteneur de stockage doit permettre la manutention standardisée des colis de stockage depuis leur constitution jusqu'à leur mise en stockage et lors d'opérations de retrait.

La géométrie et l'aménagement de la chambre de stockage, l'agencement des colis stockés, la galerie d'accès et le sas de manutention ainsi que les équipements d'exploitation permettent la mise en place des colis de déchets. Bien que faisant appel à la téléopération, les technologies de manutention à mettre en œuvre sont classiques et déjà éprouvées dans l'industrie.

La capacité à retirer des colis doit être étudiée en tenant compte du vieillissement sur la durée d'exploitation. L'impact d'éventuelles déformations structurelles des galeries d'accès n'est pas considéré comme critique dans la mesure où un accès direct à ces galeries pour réparation ou rénovation est possible. En revanche, à l'intérieur des alvéoles, on est amené à envisager l'éventualité à terme de déformations de piles de colis susceptibles de rendre une opération de retrait plus complexe que celle de mise en place. La capacité mécanique de retrait différé de colis est ainsi considérée comme une fonction critique.

Une fois un tunnel de stockage fermé, la capacité à le ré-ouvrir repose sur l'évacuation des gaz, la déconstruction des scellements aux extrémités et la remise de l'alvéole en configuration d'exploitation sûre.

Capacité à maintenir l'installation souterraine au niveau 2 puis au niveau 3 de récupérabilité, préservation des conditions du retrait des colis de stockage

Le maintien de la récupérabilité des colis de déchets pendant la période d'exploitation repose fortement sur :

- la durabilité mécanique des tunnels de stockage (revêtement en béton) et la maintenabilité mécanique de leurs galeries d'accès et de retour d'air,

⁸ Les limites à respecter en termes de volume de vides sont fonction de la hauteur excavée de manière à préserver une épaisseur de garde verticale d'argilites saines d'au moins 50 m. La présence du conteneur de stockage entre dans les évaluations du taux de vide des alvéoles. Toutefois, l'évaluation concerne l'ensemble des composants situés à l'intérieur des tunnels de stockage [5].

- la durabilité mécanique des conteneurs (conteneur de stockage ou, en leur absence, conteneur primaire). Celle-ci s'applique notamment aux exigences de confinement et de tenue au gerbage, à la chute et à l'incendie (voir *infra*) en tenant compte du vieillissement.

La durabilité des conteneurs constitue une fonction critique. Si l'objectif d'une durabilité mécanique séculaire est courant dans les travaux publics souterrains, l'Andra considère également la durabilité mécanique des tunnels de stockage et, dans une moindre mesure, celle de leurs galeries d'accès et de retour d'air, comme une fonction critique compte tenu d'une part de la nécessité d'adapter ces ouvrages aux caractéristiques des argilites et d'autre part de l'absence de maintenance à l'intérieur des alvéoles de stockage.

Avant fermeture, la durabilité des tunnels est favorisée par le maintien d'un état de faible saturation en eau pour limiter les processus de dégradation physico-chimique⁹. Cela constitue, avec l'évacuation des gaz de radiolyse, une fonction de la ventilation du tunnel de stockage.

De plus, pour limiter la dégradation des bétons, la température est réduite par l'agencement des colis dans les alvéoles¹⁰.

Les tunnels de stockage et leurs galeries d'accès doivent être aptes à être fermés, en tenant compte notamment de leur vieillissement, de la formation de gaz de radiolyse et de l'EDZ au droit des scellements.

4.2.3 Fonctions de sûreté et réduction des risques en exploitation

Protéger les personnes contre l'exposition aux rayonnements ionisants.

En exploitation, la protection contre l'exposition au rayonnement repose sur les systèmes de transfert (hotte) et les équipements fixes et mobiles d'obturation du sas en tête d'alvéole et de la galerie de ventilation.

Lors de la fermeture d'un tunnel de stockage, tout ou partie de ces équipements sont déposés. En tête d'alvéole, cette opération s'effectue à l'abri d'un dispositif définitif de protection biologique placé au plus près des colis de déchets.

Confiner les substances radioactives, de manière à se prémunir contre le risque de dispersion de ces substances

Une fonction des colis de stockage, premier système de confinement, est d'éviter la dispersion des contaminants en situation statique de stockage et lors de la mise en place et du retrait de colis de déchets, sur la durée d'exploitation, en cohérence avec la classe de ventilation des locaux :

- Le conteneur de stockage apporte lorsque cela est nécessaire une protection mécanique des colis primaires (résistance mécanique au gerbage et aux sollicitations dynamiques lors des manutentions - soulèvement ou chute de colis - en tenant compte du vieillissement sur la durée d'exploitation).
- Dans des conditions de fonctionnement dégradées, incidentelles (altération par corrosion interne ou gonflement d'un colis primaire) ou accidentelles (chute, incendie), le conteneur de stockage prévient une dissémination des substances radioactives non gazeuses.
- En cas d'incendie, le conteneur de stockage protège les colis primaires d'une élévation de température susceptible de dégrader leurs propriétés de confinement (dissémination d'aérosols). Cela concerne particulièrement les déchets bitumés, pour lesquels cette protection vise à empêcher l'initiation d'une réaction exothermique de l'enrobé. Cette protection constitue une fonction critique.

Le génie civil, associé à des dispositifs de confinement dynamique (filtres, extraction...), constitue classiquement le second système de confinement. Après fermeture d'un tunnel de stockage, les

⁹ Carbonatation atmosphérique des bétons, corrosion des armatures et des composants métalliques, reprise d'eau par les enrobés bitumineux

¹⁰ Un critère de 65 °C a été fixé [5].

dispositifs d'obturation prolongent cette fonction pendant toute la durée du maintien au niveau 3 de récupérabilité.

Maîtriser la sûreté vis-à-vis du risque de criticité

L'espacement entre colis primaires dans le colis de stockage et leur agencement dans l'alvéole de stockage doivent réaliser une configuration sûre vis-à-vis de la criticité.

Evacuer la puissance thermique des déchets.

Les critères thermiques mentionnés plus haut (durabilité des bétons de structure pendant la période d'exploitation, immobilisation des radionucléides après fermeture définitive) doivent être respectés en ne mobilisant que la conduction dans la roche¹¹.

La ventilation des galeries d'accès et celle des tunnels de stockage contribuent à l'évacuation de la chaleur vis-à-vis de la protection vis-à-vis des risques de brûlures et des systèmes électroniques (50 °C).

Evacuer les gaz formés par radiolyse

En exploitation, l'évacuation des gaz de radiolyse pour prévenir le risque d'explosion est assurée par :

- les conteneurs,
- la hotte de transfert¹²,
- la ventilation de l'alvéole maintenue aussi longtemps que celui-ci n'est pas fermé¹³.

Réduction des risques d'incendie et de chute ou collision affectant des colis de déchets

La réduction des risques d'incendie, de chute et de collision... est assurée en premier lieu par les moyens d'exploitation. Ceux-ci sont conçus notamment pour :

- assurer le maintien de l'intégrité des colis de stockage dans toutes les situations (hauteurs de levage limitées à la hauteur des colis, limitation du survol des colis par des équipements et dispositifs antichute lorsque ce survol ne peut être évité) ;
- réduire l'exposition externe du personnel aux rayonnements à un niveau aussi bas que raisonnablement possible (fonctionnement, en exploitation normale, automatisé ou piloté à distance, limitation des temps d'intervention en situation dégradée ou lors des opérations de maintenance) ;
- minimiser par conception les risques vis-à-vis de l'incendie (réduction des charges calorifiques embarquées, dispositifs de surveillance et d'extinction embarqués sur les équipements mobiles) ;
- posséder, en cas de défaillance, des modes de repli permettant de revenir dans une configuration sûre et permettant ultérieurement une intervention humaine dans des conditions de débit de dose acceptables (redondance de certains composants, « lièvres » pour ramener les chariots de mise en stockage en alvéole MAVL).

L'architecture du quartier, particulièrement le réseau de galeries d'accès, contribue à limiter les effets d'un incendie et plus généralement facilite la remédiation de situations incidentelles (sectorisation de feu etc.).

Comme indiqué plus haut le conteneur apporte une contribution par sa capacité à résister aux risques résiduels.

Séparation des activités

La séparation des zones nucléaire (tunnels de stockage en exploitation et leurs galeries d'accès), conventionnelle (tunnels d'observation inactifs...) et de chantier (tunnels de stockage en cours de construction, d'équipement ou d'essais inactifs) est assurée par le positionnement des différentes

¹¹ Cela permet notamment de ne pas préjuger de la date de décision de fermeture des tunnels de stockage.

¹² En cas de blocage de la hotte dans la descenderie ou une galerie, le déblocage de la hotte doit intervenir dans le délai pris pour le dimensionnement pour éviter le risque d'explosion.

¹³ La durée de perte éventuelle de la ventilation doit être limitée de manière à éviter le risque d'explosion.

zones dans l'installation souterraine de Cigéo (tunnels d'essai ou d'observation inactifs implantés à l'intérieur ou en dehors du quartier), les moyens d'exploitation (barrages ou sas...) et le réseau de galeries d'accès et de retour d'air.

4.3 Conteneurs de stockage

4.3.1 Etat des lieux

Les études et essais menés par l'Andra pour et depuis le Dossier 2005 ont nécessité la fabrication de maquettes partielles ou à échelle réduite pour explorer la faisabilité des solutions techniques retenues, notamment au niveau de la fermeture du colis de stockage, et de démonstrateurs à l'échelle 1⁽¹⁴⁾. Une première phase d'études et d'essais (2004-2006) a permis de valider la faisabilité d'un colis de stockage à logements ajustés avec corps et couvercle armés sur la base de colis de petites dimensions de l'ordre de 7 à 15 tonnes. Dans une seconde phase (2008-2010) des colis de grandes dimensions pouvant atteindre 25 tonnes ont été conçus et fabriqués. Ces travaux ont également intégré un programme de caractérisation du comportement du béton au jeune âge (correspondant à la phase de maturation du béton jusqu'à 90 jours au moins) et un programme d'essais en situation de chute.

En phase d'esquisse, les 59 familles de colis primaires MAVL dont la géométrie est définie ont donné lieu à l'identification de 7 concepts de conteneurs de stockage, caractérisés par leurs dimensions externes¹⁵. Cette standardisation a été menée en limitant les dimensions géométriques et la masse¹⁶ des colis de stockage pour faciliter leur manutention. De nouveaux conteneurs de stockage pourront être identifiés ultérieurement au fur et à mesure de la définition de la géométrie des colis primaires par leurs producteurs. En outre, des classes de ciment et des formulations de bétons à hautes performances (BHP) ont été sélectionnées pour répondre à l'objectif de fabriquer des bétons stables physiquement et chimiquement en situation de stockage.

A ce stade les études réalisées sur le conteneur de stockage et les essais sur maquettes en conditions d'environnement représentatives ont permis l'atteinte du niveau TRL 5.

4.3.2 Démonstration en environnement représentatif de la durabilité et de la fonction de protection thermique du conteneur (2014-2017 ; TRL 6)

Les travaux programmés d'ici 2017 viennent compléter les éléments déjà acquis et permettent l'atteinte du TRL 6 à cet horizon. Ils comprennent la démonstration de durabilité mécanique des conteneurs en environnement représentatif de l'alvéole de stockage (aptitude à la manutention et au gerbage lors de la mise en place, et lors d'un retrait pendant toute la phase d'exploitation du stockage) et leur fonction de protection thermique des colis primaires en cas d'incendie (le cas dimensionnant correspond aux déchets bitumés). En parallèle les processus industriels d'assemblage des colis de stockage en cellule sont conçus par la maîtrise d'œuvre dans le cadre des études d'avant-projet de Cigéo.

Les principaux enjeux scientifiques et techniques portent sur :

- les besoins de confinement attendus du conteneur,
- les formulations de bétons en lien avec les procédés de fabrication des conteneurs,
- les effets de l'environnement thermique, hygrométrique et irradiant sur l'évolution du béton des conteneurs,

¹⁴ Cette première mise en œuvre industrielle de la fabrication des colis a conduit à retenir (i) un système de fermeture par couvercle encastré boulonné plutôt que par clavage et accrochage car ce dernier système est apparu peu compatible avec une mise en œuvre en cellule irradiante, (ii) une formulation de béton pompable et autoplaçant qui facilite la mise en œuvre du béton et par conséquent le remplissage du moule, (iii) l'utilisation d'un moule fermé qui garantit de bonnes tolérances géométriques et dimensionnelles ainsi qu'un démoulage aisé à l'aide de noyaux rétractables mécaniquement.

¹⁵ Chaque conteneur en béton accueille à ce stade 1 à 4 colis primaires suivant les familles.

¹⁶ Respectivement moins de 2,5 m et de 17 tonnes

- la conception de conteneurs capables de limiter l'échauffement des déchets bitumés à moins de 100 °C en cas d'incendie (tout en préservant la capacité de manipuler les conteneurs).

Les conditions d'environnement à prendre en compte sont :

- la température et l'hygrométrie de l'air ventilé pendant toute la durée d'exploitation, qui peuvent influencer les cinétiques de corrosion des armatures et de carbonatation du béton des conteneurs,
- le dégagement de chaleur et le rayonnement de certains colis primaires faiblement exothermiques, qui peuvent induire une augmentation de température du béton jusqu'à 65 °C et une radiolyse du béton,
- le relâchement éventuel, par les colis primaires, d'espèces chimiques agressives pour le béton et les armatures (en cas de perte d'étanchéité du conteneur primaire pendant la période d'exploitation) : saumure associée au comportement hygroscopique des sels contenus dans certains déchets, acide formé par radiolyse.

▪ ***Etude des besoins en confinement du conteneur de stockage***

En cas de situation dégradée ou accidentelle conduisant à une perte de confinement du colis primaire, le conteneur contribue aussi à limiter la dissémination de particules radioactives. Le clavage du couvercle du conteneur MAVL pourrait être utilisé pour améliorer cette contribution. Toutefois, la mise en place d'un liant de clavage ou de blocage lors de la fermeture du conteneur MAVL implique des opérations complexes en cellule irradiante et une immobilisation des conteneurs pendant une certaine durée après l'opération de fermeture correspondant au durcissement du liant. D'autre part, le gain de performance effectif d'un conteneur non clavé par rapport à un conteneur clavé en situation de fonctionnement dégradé ou accidentelle n'est pas établi. Des études sont actuellement en cours pour instruire la possibilité de supprimer ce joint de clavage ; elles incluent la définition d'essais ad hoc (par exemple des essais en soufflerie sur des conteneurs à l'échelle 1 qui permettraient, via l'utilisation de traceurs pulvérulents, de vérifier l'absence de dissémination avec des conteneurs sans clavage).

▪ ***Mise au point de formulations de bétons***

Les travaux relatifs aux formulations de bétons hautes performances sont poursuivis en vue de répondre à la fois aux exigences de durabilité sur le colis et aux contraintes de mise en œuvre industrielle dans les moules de conteneurs. Les formulations de certains de ces bétons ont fait l'objet d'essais de convenance, mais leur mise en œuvre à l'échelle industrielle doit encore être testée ; en particulier le temps optimal du démoulage reste à déterminer en fonction du suivi de l'évolution de l'hydratation du béton¹⁷. Pour d'autres formulations (notamment celles pour les déchets bitumés), des compléments de caractérisation et de mise au point sont encore nécessaires. Ainsi, pour l'atteinte du TRL 6, les travaux visent à démontrer que les formulations sont robustes aux dosages et à la température et que leur mise en œuvre à l'échelle industrielle (préparation, cure,...) est facile, reproductible et fiable. Ils visent également à rechercher des matériaux locaux pour les granulats et éventuellement pour les ciments, fillers et additions minérales et à les utiliser dans la mise au point des formulations, en vue de limiter le bilan carbone des conteneurs. La possibilité de réduire la quantité de ciment au profit d'autres fillers pouzzolaniques est aussi analysée dans la même optique. Une attention particulière est portée sur les composés organiques inclus dans les formulations et leur éventuel impact sur la mobilité des radionucléides.

Le dégagement thermique induit par la chaleur d'hydratation des composés des formulations de béton envisagées est déterminé afin d'évaluer ces formulations vis-à-vis de critères thermomécaniques et permettre une description de l'évolution THM des matériaux à leur mise en place.

▪ ***Etudes des effets de l'irradiation sur le béton***

En complément des travaux déjà menés sur la radiolyse des matériaux cimentaires, il convient de vérifier les effets de l'irradiation sur les formulations de béton envisagées : évolutions chimiques des bétons, impact de ces évolutions sur leurs propriétés mécaniques et sur les cinétiques de corrosion des armatures s'il y a lieu pour les bétons armés. Ces études, étendues aux formulations envisagées pour

¹⁷ La phase d'hydratation conditionnant les propriétés visées, elle se doit d'être contrôlée pendant la fabrication.

les structures des tunnels de stockage, contribuent aussi à la démonstration de la durabilité de ces dernières (voir *infra*).

▪ ***Simulation de l'évolution des conditions d'environnement du colis de stockage dans l'alvéole***

Sur la base de la conception de l'installation souterraine issue des études d'APS, l'évolution de la température et de l'hygrométrie de l'air dans les tunnels de stockage et celle du béton des conteneurs sont évaluées par simulation numérique. Cette évaluation prend en compte les variations saisonnières de la température et de l'hygrométrie en surface, les distances parcourues par l'air dans l'installation souterraine jusqu'à l'alvéole de stockage, ainsi que le dégagement de chaleur des colis primaires et les durées de ventilation des alvéoles. Elle permet *in fine* d'identifier de domaine de variations des conditions d'environnement des conteneurs de stockage dans l'alvéole en fonction de la position de l'alvéole dans le quartier de stockage et en fonction des scénarios de fermeture envisagés. Des conditions représentatives des situations les plus contrastées que peuvent vivre les alvéoles sont définies pour servir de données d'entrée aux simulations de l'évolution des matériaux constitutifs du conteneur.

▪ ***Simulation de l'évolution des matériaux constitutifs et de l'évolution mécanique du conteneur***

Sur la base d'une description du conteneur et des caractéristiques mécaniques et chimiques du béton retenu à l'issue des études de formulation, la vérification de la durabilité du conteneur est établie par des simulations chimiques et mécaniques (corrosion, carbonatation atmosphérique) en tenant compte des conditions d'environnement représentatives : état hydrique, rayonnement, température (le cas échéant). L'impact chimique éventuel de certains déchets contenus dans les colis primaires dont la tenue à l'échelle séculaire ne serait pas assurée (à préciser) est également à évaluer. Ces simulations visent à préciser l'évolution de l'état physique des colis de stockage au cours de la période d'exploitation.

▪ ***Essais et dimensionnement au feu, dossiers de définition des conteneurs de stockage***

La conception de conteneurs permettant de limiter l'échauffement des déchets bitumés s'appuie sur des essais de feu en cours¹⁸. Les caractéristiques du feu de référence à prendre en compte pour la conception du conteneur sont définies sur la base de scénarios d'incendie qui résultent de l'analyse des risques dans le cadre des études d'APS. Le conteneur pour les déchets bitumés est alors dimensionné en prenant en compte le feu de référence et les résultats des essais de feu : épaisseur des parois en béton du conteneur ; densité des armatures et éventuellement formulation du béton ; incorporation éventuelle de fibres ; forme, nature et rôle structurel de ces fibres.

Plus généralement pour l'ensemble des déchets MAVL, la définition des conteneurs de stockage prend en compte les résultats des études et recherches concernant la durabilité pour confirmer notamment les épaisseurs de béton ainsi que ceux des études d'APD de Cigéo pour les interfaces avec les moyens d'exploitation.

4.3.3 Démonstration en environnement opérationnel des performances du conteneur (2018-2024 ; TRL 7)

Avant d'engager le processus industriel de fabrication de colis de stockage de déchets MAVL, l'Andra prévoit de vérifier, en environnement opérationnel, les performances du conteneur tel que défini à l'issue de la période précédente. Cela permet d'atteindre le TRL 7 à l'horizon du démarrage de la phase industrielle pilote.

Outre la durabilité du conteneur en situation de stockage, en lien avec son aptitude à la manutention et au gerbage lors de sa mise en place et en cas de retrait, et sa fonction de protection thermique des déchets bitumés, les performances à vérifier pour cet objectif comprennent l'évacuation des gaz de radiolyse et la tenue à la chute, en tenant compte autant que possible du vieillissement sur la durée d'exploitation.

¹⁸ Ces essais apportent les éléments de justification en réponse à la demande de l'ASN, dans son avis sur le Dossier 2009, de « justifier l'exclusion d'un scénario d'incendie de reprise de réactions exothermiques à l'intérieur de colis, notamment de boues bitumées »

Comme dans la période précédente, les travaux associent des essais et des simulations. En comparaison de la période précédente :

- Les essais portent sur des modèles représentatifs de tous les aspects du dossier de définition, fabriqués par des procédés les mieux adaptés aux performances recherchées et préfigurant les procédés industriels.
- Les conditions d'environnement THMCR identifiées plus haut sont précisées par des simulations de l'évolution des alvéoles de stockage telles que définies dans le cadre des études d'APD. Ces conditions seront appliquées aux modèles de conteneur de façon à combiner autant que possible leurs effets respectifs.

Les modèles physiques de conteneurs font l'objet :

- d'examen permettant de valider le choix des procédés de fabrication,
- d'essais de durabilité en environnement opérationnel,
- d'essais de manutention, de chute, de feu et d'évacuation de gaz en tenant compte du vieillissement du conteneur sur la durée d'exploitation (essais en surface).

La préparation de ces travaux implique des études préalables notamment pour :

- définir des modalités d'essais (manutention, chute, feu, évacuation de gaz) permettant de traduire les effets du vieillissement,
- élaborer un programme d'essais de durabilité, sur maquettes complètes et/ou sur échantillons, permettant de reproduire au mieux l'environnement opérationnel.

Les hypothèses prises jusqu'ici pour le dimensionnement mécanique des conteneurs à la chute sont une hauteur de chute comprise entre 1,2 m et 2,3 m. Ces sollicitations conduisent à porter une attention particulière au système de fermeture du conteneur par vis (nombre et caractéristiques des vis). Le couvercle peut également nécessiter un ferrailage renforcé pour résister à l'impact des colis primaires. Au final la hauteur de chute à retenir pour finaliser le dimensionnement et démontrer la technologie du conteneur de stockage dépend des procédés de manutention : les procédés à l'étude (pont gerbeur) visent à réduire cette hauteur (voir *infra*).

Concernant la capacité du conteneur à évacuer les gaz de radiolyse, des modélisations ont déjà permis de vérifier, en l'absence de disposition spécifique, la capacité du conteneur à évacuer l'hydrogène par ses voiles. Ces simulations se sont appuyées sur des formulations en cours de développement et pour différentes conditions d'environnement caractéristiques de situations de stockage. Elles doivent être reconduites en conditions opérationnelles (incluant l'effet des variations climatiques périodiques) et sur la base des formulations retenues dans les dossiers de définition. Ces simulations peuvent être complétées par des essais en surface, sur des modèles physiques.

4.3.4 Qualification et mise en œuvre (2021-2035 ; TRL 8, TRL 9)

L'industrialisation de la production de conteneurs de stockage commence par l'identification des sites de préfabrication : site à créer à proximité de Cigéo et/ou sites industriels existants. L'étude de ces sites permet d'en rendre compte dans l'étude d'impact de Cigéo. Puis l'autorisation de création de Cigéo enclenche, le cas échéant, la mise en place proprement dite du système industriel de préfabrication et de la logistique associée (approvisionnements en granulats, transports...).

Les procédés et équipements de préfabrication font l'objet d'essais de qualification : il s'agit d'une part de procéder à des essais de convenance des produits pour vérifier leur conformité avec les dossiers de définition et les performances attendues, d'autre part de s'assurer de la maîtrise des paramètres de fabrication et de la reproductibilité des procédés. Les protocoles d'essai mis en œuvre pour l'étape précédente peuvent être en partie réutilisés.

En parallèle, les équipements d'assemblage et de contrôle en cellule des colis de stockage font aussi l'objet d'essais sur site fournisseur. Après leur installation dans l'atelier nucléaire de surface de Cigéo,

des essais d'assemblage de colis de stockage sont réalisés en situation réelle en intégrant des maquettes inactives des premiers colis primaires MAVL à livrer sur Cigéo. Des colis de stockage inactifs sont transférés dans l'installation souterraine jusqu'à leur emplacement de stockage, permettant de vérifier leur aptitude à la manutention par les moyens d'exploitation réels de Cigéo, dans des conditions d'exploitation normale et dégradées. Leur récupération et leur retour dans l'atelier nucléaire de surface sont également testés dans les mêmes conditions. L'autorisation de mise en service de Cigéo, particulièrement l'atelier nucléaire de surface, traduit l'atteinte du TRL 8 pour les colis de stockage.

La fabrication de colis de stockage réels dans le cadre de la phase industrielle pilote permet de vérifier leur aptitude à la manutention (mise en place, récupération), d'abord dans le cadre d'essais de démarrage en actif, puis en contexte industriel. L'observation de leur évolution sur la durée en situation de stockage permet de conforter leur comportement vis-à-vis des exigences de durabilité.

Déroulement des travaux sur le conteneur de stockage MAVL

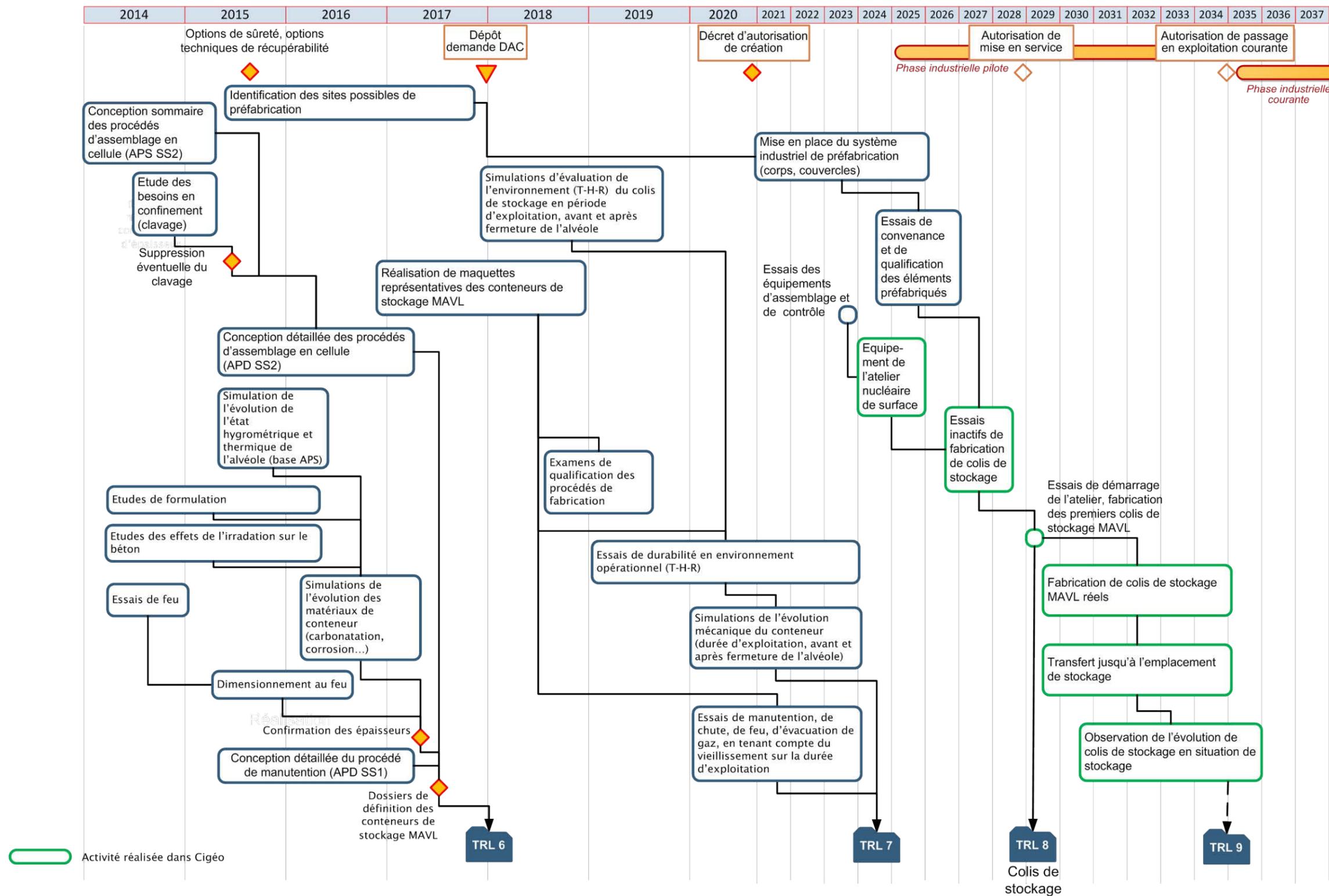


Figure 4.3-1 Logigramme des études et travaux sur les conteneurs de stockage des déchets MAVL d'ici au passage à l'exploitation industrielle courante de Cigéo

4.4 Tunnel de stockage

4.4.1 Etat des lieux (TRL 5)

Les enjeux scientifiques et techniques prioritaires du tunnel de stockage concernent (i) les techniques de creusement, (ii) le dimensionnement du revêtement/soutènement au regard du diamètre d'ouvrage et du mode de creusement considérés et (iii) les performances du tunnel en matière de durabilité mécanique et de limitation de l'EDZ au regard des conditions d'environnement (*i.e.* sollicitations internes et externes).

En ce qui concerne les techniques de creusement, des ouvrages du Laboratoire souterrain ont été construits avec des méthodes représentatives de celles des tunnels MAVL (MAP) dans la direction de la contrainte principale majeure. Cette technique a aujourd'hui été testée jusqu'à un diamètre de près de 8 mètres (tronçon de galerie GRD3), représentatif des tunnels de stockage de 65 m². Le soutènement par béton projeté et boulonnage a été également testé (complété selon les cas par des cintres métalliques). La réalisation d'un béton de revêtement coffré a été testée sur un diamètre plus petit.

En matière de revêtement/soutènement, la stratégie expérimentale mise en œuvre au niveau principal du Laboratoire a été de réaliser des galeries orientées dans la direction de la contrainte principale majeure avec des soutènements/revêtements de plus en plus rigides afin de pouvoir comparer leur comportement à court et moyen terme. Les premiers soutènements en béton mis en œuvre étaient des soutènements dits « souples », c'est-à-dire accompagnant les convergences du terrain (béton projeté avec ou sans cales compressibles). Puis, des soutènements plus rigides (épaisseur accrue et revêtements coulés en place quelques mois après le creusement) ont aussi été réalisés afin de limiter les déformations du terrain et enfin, des revêtements posés rapidement après le creusement de la galerie (béton projeté épais en 2012, voussoirs en béton en 2013). Tous ces ouvrages sont ou vont être instrumentés. Les comparaisons des mesures de contraintes et de déformations dans et autour de ces différents soutènements/revêtements constituent un apport important pour le dimensionnement¹⁹ des tunnels de stockage dans le cadre des études d'APS puis d'APD²⁰ (voir *infra*).

Les observations de la zone endommagée au Laboratoire souterrain ont permis d'obtenir une bonne description des caractéristiques géométriques de la zone endommagée et de sa structuration en termes de fracturation et d'organisation spatiale de cette fracturation. On dispose de modèles mécaniques des argilites capables de représenter la formation de la zone endommagée et plus particulièrement la distribution spatiale anisotrope de la fracturation. Cependant l'habillage de la zone endommagée, en tant que milieu argileux fracturé, en comportement contrainte-déformation à court et long termes, nécessite encore des travaux de R&D.

Le fonctionnement et la durabilité des tunnels de stockage sur la période d'exploitation ont fait l'objet de modélisations. En particulier, des efforts importants ont été engagés pour caractériser l'environnement multi-composants gaz (oxygène, hydrogène, vapeur d'eau) en fonctionnement normal et incidentel (arrêt de ventilation) s'appuyant sur la description précise de la production et du devenir des gaz dans les tunnels MAVL, en tenant compte des différents aspects de la conception (débit de ventilation, modalités de gerbage, longueur de tunnel, géométrie...) et (ii) la définition du couplage entre la ventilation, la production et la migration de l'hydrogène. Les résultats obtenus soulignent la nécessité d'évaluer précisément les processus thermo-aérauliques en lien avec la définition de plus en plus précise de la conception (dimensionnement de la ventilation, dimensionnement mécaniques des différents composants en béton, répartition des jeux fonctionnels et plus généralement les sections de passage de l'air...) afin de rendre compte de l'organisation spatio-temporelle de l'aéragé de l'alvéole (zones ventilées, zones « mortes ») et de la charge thermique (champ de température, gradients thermiques...).

¹⁹ Au-delà des données de calage des modèles de comportement mécanique de l'argilite et du béton, elles donnent accès aux mécanismes d'interactions entre le terrain et les structures, qui peuvent avoir un impact fort sur le dimensionnement.

²⁰ La zone fracturée connectée induite par le creusement présente des caractéristiques de plasticité et de déformations différées spécifiques. Cela induit un chargement « à court terme » anisotrope des revêtements même pour des ouvrages orientés parallèlement à la contrainte principale majeure comme les tunnels de stockage, soumis à un champ de contraintes isotropes.

D'autre part, la prise en compte des évolutions chimiques a été réalisée en tenant compte d'une dégradation par lixiviation des composants cimentaires, traduite par une diminution des valeurs des modules d'élasticité par palier dans le temps. L'analyse phénoménologique des situations de stockage (APSS) a pris en compte l'ensemble des processus phénoménologiques d'origine thermique, hydraulique, mécanique, chimique et radiologique qui affectent les composants des ouvrages et le milieu géologique dans le temps. En focalisant l'analyse sur la période d'exploitation et en y apportant en continu les avancées de connaissances scientifiques et techniques (travaux de simulation, études et recherches en laboratoire de surface et au Laboratoire souterrain), l'APSS-Exploitation fournit une description plus approfondie, notamment en justifiant l'analyse par une meilleure quantification des processus (comportement des colis de stockage inclus), et plus particulièrement des temps caractéristiques des phénomènes affectant chaque composant.

L'ensemble de ces travaux techniques et scientifiques confère le TRL 5 au tunnel de stockage (en section 65 m²).

4.4.2 Conception détaillée, démonstration en environnement représentatif de la construction, de la maîtrise de l'EDZ et de la durabilité du tunnel de stockage (2014-2017 ; TRL 6)

Comme pour le conteneur de stockage, les travaux programmés d'ici 2017 sur le tunnel de stockage complètent les éléments déjà acquis pour atteindre le TRL 6 à cet horizon.

Les conditions d'environnement à prendre en compte sont induites par :

- Le milieu géologique :
 - Chargement mécanique du tunnel ;
 - Echanges hydriques entre les argilites et le tunnel ;
 - Aléa sismique²¹ ;
- la ventilation (avant fermeture) ou non (après fermeture) du tunnel et ses conséquences sur les processus mis en jeu :
 - Processus thermiques : cycles thermiques transportés par la ventilation (couplés le cas échéant avec le dégagement de chaleur par les déchets, cf. ci-après) ;
 - Processus hydriques et hydrauliques : cycles hydriques transportés par la ventilation, désaturation/resaturation des composants ouvrages et naturels ;
 - Processus chimiques : renouvellement ou consommation de l'oxygène (état redox) et du CO₂ (carbonatation atmosphérique) ;
- les colis de déchets et les constituants du tunnel :
 - Température²² ;
 - Dégagement de gaz (hydrogène) par radiolyse des composés organiques (avant et après fermeture du tunnel) et par corrosion aqueuse des matériaux métalliques en conditions anoxiques (après fermeture du tunnel), selon les familles de déchets ;
 - Comportement hygroscopique de certains déchets (type déchets salins) ;
 - Conditions chimiques induites par les espèces réactives relâchées par certains colis de déchets MAVL ;

²¹ Le génie civil des alvéoles de stockage et de leurs galeries d'accès est dimensionné aux "Séismes Majorés de Sécurité" (SMS) pour que ces ouvrages ne s'effondrent pas et ne constituent pas une agression potentielle des colis de déchets [5].

²² Jusqu'à 65 °C au plus de manière transitoire dans les bétons, 30 °C dans les déchets bitumés.

- Débit de dose à l'extrados des colis de stockage (la radiolyse de l'air humide ou de l'eau est susceptible de produire des espèces oxydantes comme H_2O_2 ou des espèces chimiques acides comme HNO_3).

▪ **Etudes de conception (2014-2017)**

Les études de conception sommaire puis détaillée des tunnels de stockage sont réalisées de 2014 à 2017 par les maîtrises d'œuvre du projet Cigéo. Elles partent d'une part des études d'esquisse, d'autre part des pistes d'optimisation identifiées en 2014. Elles couvrent notamment le dimensionnement géotechnique, l'aptitude à la manutention des colis de déchets en lien avec la conception des systèmes d'exploitation (§ 4.6), l'aptitude à la fermeture, le respect des critères thermiques qui ont été fixés par l'Andra, la sécurité du chantier de creusement, notamment vis-à-vis du risque de chute de bloc au front de taille et aux parements²³, la protection contre l'exposition aux rayonnements ainsi que la sûreté-criticité en configuration d'exploitation. Elles fournissent les justifications de la conformité aux performances attendues (notes de calcul etc.).

Pour le dimensionnement géotechnique, l'Andra a entrepris de transmettre et d'expliquer la base de connaissances issues du Laboratoire souterrain aux maîtrises d'œuvre. Un travail itératif entre l'Andra et les maîtrises d'œuvre s'en suit dans le cadre des études d'APS puis d'APD de manière à :

- appliquer les connaissances acquises à un dimensionnement d'ingénierie exploitant les meilleures pratiques et le retour d'expérience industriels,
- utiliser les règles du génie civil et les coefficients de sécurité associés en tenant compte du niveau des connaissances, supérieur à la situation habituelle des grands travaux souterrains,
- relier les travaux de conception et à ceux de modélisation²⁴.

Au stade de l'avant-projet, l'utilisation conjointe de l'expérience des grands travaux souterrains, des règles du génie civil et de la base de connaissances du Laboratoire visent à un dimensionnement des alvéoles MAVL leur conférant la stabilité mécanique et géométrique recherchée pendant la durée d'exploitation et optimisant les épaisseurs de béton mises en œuvre.

Les études d'avant-projet comprennent l'étude exploratoire du stockage direct de certains colis primaires, sans conteneur de stockage. D'ici la fin des études d'APS (2015), il s'agit d'évaluer plus en détail la faisabilité et les avantages cette option et de l'amener au stade de définition de l'APS, afin de décider des suites à donner : (i) abandon ou au contraire (ii) adoption en tant que solution de référence, ou éventuellement (iii) maintien en tant que voie d'opportunité pour certains colis de déchets non concernés par la phase industrielle pilote (dans la suite, on suppose que cette troisième hypothèse n'est pas retenue en 2015).

La possibilité de co-stocker différentes familles de déchets MAVL dans un même alvéole repose au plan physico-chimique sur la maîtrise des conditions induites et de leurs conséquences sur le comportement des radionucléides. Les options de co-stockage sont fixées par l'Andra en entrée aux études d'APD²⁵.

Le choix des critères physico-chimiques de regroupement ou de séparation par familles de déchets au sein d'un même alvéole se fonde sur :

- les résultats de R&D, travaux expérimentaux et modélisations sur les processus physico-chimiques (dégradation des matériaux, interactions dans des conditions de mélange de termes sources chimiques) tels que les cinétiques bactériennes dans les conditions de pH variables des alvéoles, les paramètres des modèles d'activité des ions en solutions salines ou encore les

²³ Les observations au Laboratoire souterrain montrent que, au voisinage d'un ouvrage d'axe parallèle à la contrainte principale majeure, la fracturation des argilites induite par le creusement se développe essentiellement sur les parois latérales.

²⁴ Les travaux de R&D en cours sur la modélisation de la zone endommagée par un milieu fracturé permettront de vérifier le caractère enveloppe des modèles de milieux poreux continus équivalents utilisés à ce stade pour les dimensionnements.

²⁵ Le co-stockage de familles différentes de déchets MAVL permet de limiter le nombre total de tunnels de stockage et d'améliorer la compacité de l'installation souterraine.

paramètres thermodynamiques et cinétiques de rétention des radionucléides en fonction des conditions redox ;

- les travaux de simulation numérique permettant de représenter l'évolution physico-chimique des colis de déchets, des tunnels, de leurs scellements et de leur champ proche, afin notamment d'évaluer l'extension des panaches chimiques et radiologiques.

Concernant l'impact éventuel des matières organiques d'adjuvantation des bétons, l'identification de leurs natures et masses permet une comparaison à l'échelle du colis et de l'alvéole avec la nature et les masses de matières organiques présentes dans les déchets. Il s'agit alors d'en évaluer les conséquences sur la mobilité des radionucléides, en fonction des familles de déchets co-stockées dans le même alvéole.

La résistance des tunnels de stockage au séisme est évaluée dans le cadre des études d'APS et d'APD.

▪ *Etudes et recherches sur l'évolution dans le temps du tunnel de stockage et sur l'EDZ (2014-2017)*

En support à la conception des tunnels de stockage, un essai complémentaire de creusement de galerie parallèle à la contrainte principale majeure est réalisé au Laboratoire souterrain en 2014-2015. Il vise à évaluer la possibilité de réduire l'EDZ et d'améliorer le comportement mécanique de l'ouvrage *via* son mode de réalisation : la galerie « GRM3 » (échelle ½ par rapport au tunnel de stockage) est creusée d'abord dans un diamètre réduit, puis alésée au diamètre final²⁶.

Pour atteindre le TRL 6 en 2017, l'évolution des tunnels de stockage est étudiée par simulations numériques reproduisant les conditions représentatives définies plus haut. Elles précisent et actualisent ces conditions d'environnement sur la base des options de conception retenues en entrée d'APS puis d'APD, y compris les voies d'opportunité mentionnées plus haut. Elles rendent compte de l'ensemble des processus qui sous-tendent les performances des tunnels en termes de durabilité mécanique et d'évolution de l'EDZ :

- Du point de vue thermique, les simulations permettent de vérifier le respect des critères de températures. Ces simulations mettent en jeu les transferts à l'échelle de l'alvéole (cas des alvéoles contenant des colis de déchets faiblement exothermiques), à celle du quartier (interactions entre alvéoles, § 5.5.2) et à celle de l'ensemble de l'installation souterraine (effet des cycliques climatiques transportés par la ventilation en exploitation).
- Du point de vue thermo-aéraulique/gaz : en lien avec la définition plus précise des concepts, des chroniques et des dossiers de connaissances sur le comportement des colis, une mise à jour des connaissances permet de vérifier que ce fonctionnement est conforme au domaine autorisé/défini (et ainsi de dégager les marges par rapport au dimensionnement), de prévoir le fonctionnement pour anticiper les décisions et contribuer à définir l'observation et la surveillance et conforter l'image d'un stockage durable pour prévenir de son vieillissement.
 - o en niveau 2, des modélisations actualisées sur la base des concepts issus des phases APS puis APD visent à évaluer finement et de façon quantitative l'évolution de la concentration en hydrogène dans l'air en fonctionnement normal et incidentel (arrêt de ventilation) et ce, afin de fournir des clés de lecture vis-à-vis de la sûreté d'exploitation. Il s'agit en particulier de représenter le plus fidèlement possible les phénomènes mis en jeu afin de dégager des marges (incertitudes comprises)
 - o en niveau 3 : à ce stade, en lien avec l'état des connaissances, les études ont soit considéré une production d'hydrogène constante (en lien avec le critère d'acceptation des colis vis-à-vis de la production de gaz), soit une production de gaz qui ne tenait pas compte des conditions d'environnement hydraulique/hydrique. Pour la DAC, des études plus poussées visent à intégrer l'effet de la décroissance radioactive dans les mécanismes de production d'hydrogène par radiolyse (déchets de boues bitumées et de matière organique) et l'effet des conditions hydriques sur la production d'hydrogène par corrosion anoxique (déchets de matériaux métalliques). L'intégration

²⁶ La première phase de creusement entraîne une décharge mécanique des argilites au voisinage, qui modifie les conditions d'environnement mécanique pour la seconde phase.

de ces mécanismes permet de représenter plus fidèlement l'évolution des concentrations d'hydrogène et d'oxygène en situation de stockage normale afin de fournir des clés de lecture pour la gestion réversible, la sûreté d'exploitation et en dégageant des marges

- Du point de vue hydraulique/gaz (humidité relative pendant la phase d'exploitation ventilée puis état de saturation après fermeture), les simulations déterminent les conditions d'ambiance pendant la période d'exploitation. Cela concerne les niveaux d'hygrométrie et les concentrations d'hydrogène dans les alvéoles en fonction des paramètres d'exploitation (débit de ventilation, niveau de chargement), du temps (décroissance radiolytique) et des éventuels couplages avec la thermique des déchets.
- Du point de vue chimique et en lien avec la thermique et l'hydraulique, la prédiction de l'évolution chimique (carbonatation, corrosion) permet de démontrer la durabilité chimique des structures sur la durée d'exploitation. Elle prend en compte les principaux processus susceptibles d'affecter l'état physique des bétons armés, liés à la présence d'espèces pouvant modifier les cinétiques de corrosion des aciers. La corrosion des aciers en milieu cimentaire est évaluée en fonction des états de saturation des bétons. En particulier, ces études traitent les couplages entre les cinétiques de corrosion et l'évolution des différents processus susceptibles de les modifier.

Du point de vue mécanique, les simulations effectuées en lien avec les conditions d'environnement thermique, hydrique et chimiques susmentionnées, montrent l'absence d'évolution majeure dans les tunnels de stockage sur une durée séculaire. Elles évaluent aussi l'occurrence, l'amplitude et l'évolution de déformations différentielles au sein du tunnel sur la durée d'exploitation susceptibles d'entraîner une inclinaison des piles de colis ou entraver la circulation de moyens de manutention ; ces déformations constituent des conditions d'environnement des systèmes de mise en place et retrait des colis de déchets (§ 4.6) : tolérances de mise en œuvre pouvant conduire à des déviations géométriques (de planéité, d'alignement, d'irrégularité), déformations (thermo) mécaniques différentielles entre plots de bétonnages, mouvements post-constructions (comportement différé des argilites, tassements liés à l'empilement des colis, retrait du béton, décalages altimétriques...). Elles analysent l'apport de la prise en compte du fluage du béton sur la prédiction du comportement du revêtement, en vue de l'optimisation du dimensionnement géotechnique.

Les simulations mécaniques portent aussi sur l'EDZ et son évolution sur la durée, après perte de l'intégrité mécanique des revêtements (incluant les effets THM pour les tunnels concernés par le stockage de colis de déchets faiblement exothermiques). Elles visent à réduire les incertitudes actuelles sur la zone endommagée (en lien avec les essais prévus au Laboratoire souterrain) et sur son évolution aussi bien pour le concept de référence (section de 65 m²) que pour la voie d'optimisation avec une plus grande section (115 m²).

Ces simulations mécaniques s'effectuent en lien avec celles réalisées à l'échelle du quartier et qui permettent de vérifier l'absence d'interactions notables (§ 4.5).

Afin de quantifier plus finement l'extension et l'évolution de cette zone endommagée et retrouver l'allure des zones endommagées anisotropes observées pour les ouvrages orientés suivant la contrainte principale majeure, l'utilisation d'une loi de comportement anisotrope de l'argilite est nécessaire dans le cadre des modélisations en milieu continu équivalent. Des efforts se poursuivent²⁷ pour développer et intégrer l'effet de l'anisotropie structurelle et/ou induite. De plus, afin de contrôler davantage le comportement intrinsèque de la zone de fracturation (initiation et propagation de fractures), il est nécessaire de s'orienter vers l'utilisation d'approches capables de prendre en compte de manière discrète les discontinuités (du type des méthodes enrichies prenant en compte explicitement la propagation de fracture). En effet, des modélisations en milieu continu équivalent font apparaître des zones de localisation des déformations de cisaillement qui rappellent l'initiation des chevrons mais ne

²⁷ Ces recherches sont menées dans le cadre du groupement de laboratoires « Comportement THM-gaz des ouvrages et composants ».

permettent pas de rendre compte explicitement de l'apparition des discontinuités qui constituent les fissures localisées de la zone endommagée initiale, ni de leur évolution dans le temps en tant que discontinuités ou en tant que milieu poreux. Les travaux visent à disposer des outils permettant notamment de comparer d'ici 2017 les approches milieu continu et milieu fracturé sur les tunnels de stockage (65 à 115 m²).

▪ **Etudes de criticité à long terme (2016-2017)**

Sur la base des prédictions de l'évolution hydraulique et mécanique de l'alvéole et en particulier de sa géométrie, l'analyse des modalités de déplacement des matières fissiles dans le tunnel permet de vérifier le maintien de son caractère sous-critique sur la durée. Ce travail inclut notamment une évaluation comparative des concepts avec et sans conteneur de stockage (voir *supra*, études de conception).

4.4.2.1 Démonstration en environnement opérationnel des performances du tunnel de stockage (2018-2024 ; TRL 7)

A l'instar des conteneurs de stockage, l'Andra vise à atteindre le TRL 7 avant de construire les tunnels de stockage de la phase industrielle pilote. Cela conduit à vérifier d'ici à 2024, en conditions d'environnement opérationnelles et en cohérence avec les résultats des études d'APD :

- la durabilité mécanique du tunnel, son aptitude à la mise en place des colis de déchets et à leur retrait en tenant compte du vieillissement sur la durée d'exploitation ;
- l'aptitude du tunnel à être fermé ;
- l'EDZ et son évolution ;
- l'impact de l'évolution des conditions chimiques à long terme dans le tunnel et le champ proche, particulièrement le pH basique, sur l'altération des déchets et sur la corrosion anoxique des aciers ;
- l'impact physico-chimique des colis de déchets co-stockés dans un même tunnel et celui des matériaux constitutifs du tunnel (se superposant à celui des conteneurs de stockage) sur la mobilité des radionucléides (et des toxiques).

▪ **Essai de construction d'un tunnel de stockage, caractérisation de l'EDZ (2018-2019)**

Pour démontrer la constructibilité du tunnel de stockage et l'extension limitée de l'EDZ, l'Andra prévoit de construire au Laboratoire souterrain en 2018-2019 une galerie de dimension représentative d'une portion courante d'alvéole MAVL telle que prévue en référence dans Cigéo²⁸ (même section excavée, même revêtement). Les techniques de réalisation doivent cependant être adaptées aux limites techniques imposées par les capacités du Laboratoire (réalisation en sections divisées). Cette galerie est dimensionnée sur la base des résultats des études d'APD (2017). Les instrumentations mises en place ont en particulier pour objectif de caractériser l'EDZ et de suivre son évolution hydromécanique ainsi que la mise en charge progressive du revêtement.

▪ **Travaux de caractérisation des conditions d'environnement opérationnelles (2017-2019)**

Le premier volet des travaux à réaliser sur la base de la conception d'APD des tunnels consiste à actualiser et quantifier les conditions d'environnement opérationnelles :

- En matière de chargement mécanique par les argilites, ces travaux s'appuient sur la poursuite des observations au Laboratoire souterrain d'ici 2018 puis sur la période 2018-2024. Celles-ci permettent en particulier de réduire notablement les incertitudes actuelles sur les vitesses de déformation différée des argilites à long terme (principalement celle des argilites endommagées au voisinage des ouvrages).

²⁸ Avis ASN n°2011-AV-129 du 26 juillet 2011 : « s'agissant de la maîtrise des risques après la fermeture du stockage, l'Andra devra compléter ses connaissances relatives à l'endommagement de la roche autour des grands ouvrages et à leur scellement. L'ASN considère nécessaire que l'Andra ait recours pour la qualification de ces ouvrages à des démonstrateurs in situ à une échelle représentative des ouvrages à réaliser. »

- Les travaux d'évaluation des conditions d'environnement thermo-aérauliques (niveau 2), thermiques (au-delà du niveau 3 inclus) et hydriques d'un tunnel prennent en compte la cyclicité de température et d'hygrométrie. L'impact de la formation de gaz de radiolyse sur l'évolution hydrique est pris en compte, de même que celui de l'évolution hydrique sur la formation de gaz de corrosion anoxique.
- Les modélisations portent également sur l'évolution du pH et des conditions physico-chimiques (potentiel redox...) au cours du temps après fermeture. Ces modélisations présentent un caractère itératif avec les simulations hydriques pour rendre compte des effets de couplage entre les conditions hydriques, le pH et la corrosion.
- A partir de la description du contenu en composés organiques et espèces complexantes des colis de déchets et des structures du tunnel, la disponibilité de complexants susceptibles d'impacter le comportement des radionucléides est évaluée au cours du temps dans les différents types de tunnels de stockage.
- Enfin, les débits de dose dans les tunnels de stockage en période d'exploitation (avant et après leur fermeture) sont mis à jour.

▪ **Etudes et essais de performances (2019-2023...)**

Le deuxième volet de travaux consiste en des essais de performances visant à reproduire au mieux les conditions opérationnelles.

Ces travaux utilisent en premier lieu le tunnel représentatif construit en 2018-2019 : aptitude à la maintenance et à la fermeture (voir *infra*, § 4.6), évolution de l'EDZ et du chargement mécanique du revêtement, évolution hygrométrique et chimique des bétons...

Ils peuvent être complétés par des essais sur des bancs ad hoc, pour se rapprocher de certaines conditions d'environnement non reproduites dans le tunnel (effet du débit de dose sur les bétons de structure par exemple) et pour « accélérer » les processus de vieillissement (effets du pH, de la corrosion etc.).

La conception du programme d'essais est initiée en 2017 afin de le prendre en compte lors de la construction du tunnel représentatif.

Le suivi des essais in situ se poursuit au-delà de 2024, permettant l'observation de l'impact des effets différés sur une durée d'ordre décennal.

▪ **Simulations des performances (2020-2024)**

En complément des essais, l'atteinte du TRL 7 implique aussi un volet de simulations de performances afin de transposer les résultats expérimentaux à de plus grandes échelles de temps et d'espace :

- évolution des bétons de structure (déformations,...) et du milieu géologique (EDZ, impact thermo-hydro-mécanique sur les argilites) ;
- altération des déchets, spéciation et mobilité des radionucléides, parts respectives de diffusion dans le Callovo-Oxfordien et de migration via les galeries d'accès.

4.4.2.2 Qualification et mise en œuvre (2025-... TRL 8, TRL9)

Tunnels de section 65 m²

Au plus tôt après la mise à disposition des ouvrages de liaison avec la surface, un premier tunnel de section 65 m² environ, représentatif des tunnels de stockage, est réalisé. Ce tunnel d'observation n'est pas destiné à recevoir des colis de déchets réels, mais à y mettre en œuvre des moyens et méthodes d'auscultation incompatibles avec l'exploitation nucléaire (y compris la possibilité d'examen destructifs périodiques).

Suite à la construction de premiers tunnels de stockage réels de section 65 m² environ, leur recette (vérification de conformité de la géométrie, de la résistance mécanique et de la composition chimique

des structures, des interfaces avec les moyens d'exploitation, de l'EDZ...) puis la réalisation d'essais de manutention de colis de déchets en inactif conduisent à l'atteinte du TRL 8 à l'horizon 2028. Le suivi des ouvrages au Laboratoire souterrain, particulièrement celui du tunnel représentatif construit en 2018-2019, apporte des connaissances complémentaires sur leur évolution dans la durée, recoupées avec les observations à court terme réalisées sur les tunnels de Cigéo.

L'autorisation de mise en service de l'installation (à l'horizon 2029) permet d'engager les essais de chargements en actif d'un tunnel réel. Une démonstration de retrait de colis de déchets est également effectuée. Deux tunnels de stockage mis en actif pendant la phase industrielle pilote sont des alvéoles d'observation [5].

Une période d'observation de plusieurs années, dont les résultats sont évalués au regard de ceux des essais menés au Laboratoire souterrain en conditions opérationnelles, ainsi qu'une nouvelle démonstration de retrait, conduisent au TRL 9 au terme de la phase industrielle pilote.

Tunnels de section augmentée (115 m²)

Si la voie d'opportunité consistant à augmenter la section des tunnels de stockage (115 m²) ne s'applique pas aux premiers tunnels de stockage MAVL, des essais *in situ* sont réalisés dans le cadre de la phase industrielle pilote afin de conduire cette évolution technologique au TRL 7. Cela comprend la construction d'un tunnel d'essai intégrant tous les éléments de la conception²⁹. L'EDZ est caractérisé et les contraintes et déformations dans le revêtement sont suivies³⁰. Des essais inactifs d'exploitation y sont réalisés (§ 4.6).

L'atteinte du TRL 7 permet d'envisager dans le cadre de la phase industrielle courante la construction de tunnels de stockage intégrant les voies d'opportunité.

²⁹ La longueur du tunnel d'essai est réduite par rapport à celle de tunnels de stockage.

³⁰ L'augmentation du diamètre d'un ouvrage a un impact sur la géométrie, l'extension et l'évolution de la zone endommagée, ainsi que sur les modalités de chargement du revêtement/soutènement. L'intégration d'alvéoles de plus grand diamètre suppose aussi un ajustement du niveau altimétrique des radiers.

Déroulement des travaux sur les tunnels de stockage MAVL

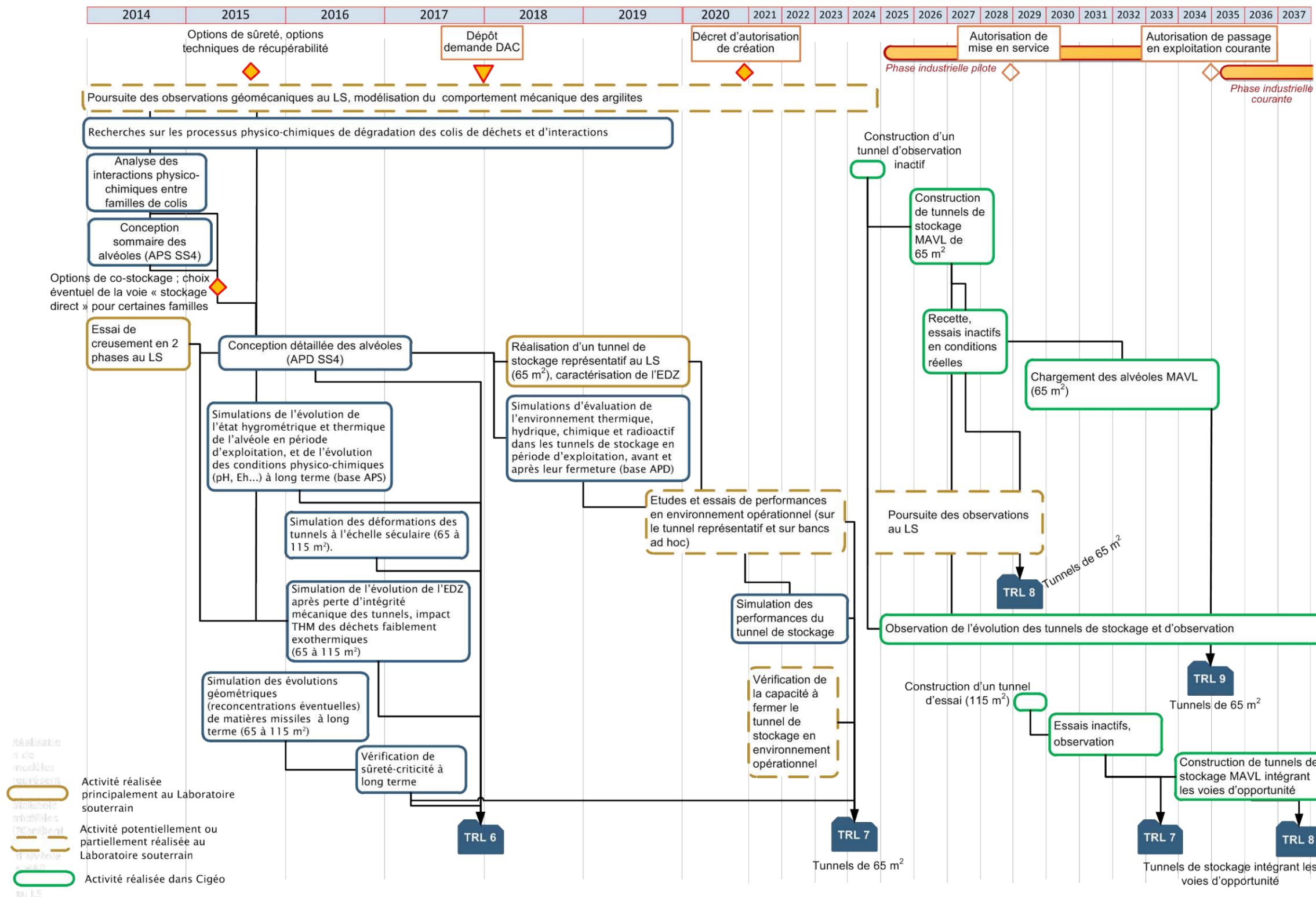


Figure 4.4-1 Logigramme des études et travaux sur les tunnels de stockage des déchets MAVL d'ici au passage à l'exploitation industrielle courante de Cigéo

4.5 Quartier de stockage

Cette section développe les travaux à venir concernant d'une part l'implantation d'ensemble des tunnels de stockage dans la couche argileuse du Callovo-Oxfordien et les interactions phénoménologiques entre ces tunnels au sein d'un quartier, d'autre part les galeries d'accès aux tunnels et de retour d'air situées à l'intérieur du quartier.

Une part des galeries d'accès³¹ et de retour d'air est orientée orthogonalement aux tunnels de stockage, induisant des enjeux scientifiques et techniques spécifiques.

Une autre part de ces galeries se situe dans le prolongement des tunnels de stockage. Les enjeux identiques aux tunnels de stockage sont couverts par les travaux décrits à la section 4.4. Ceux associés à la maîtrise de l'EDZ au droit des scellements de fermeture des alvéoles sont en partie comparables aux tronçons de galeries de liaison devant accueillir des scellements³², renvoyant aux travaux présentés au chapitre 6 ; ils s'en distinguent potentiellement par les méthodes de creusement et de soutènement.

4.5.1 Etat des lieux (TRL 5)

Au stade de l'esquisse industrielle de Cigéo établie par la maîtrise d'œuvre « système », l'ensemble des tunnels de stockage de déchets MAVL sont regroupés dans un même quartier. Celui-ci est dimensionné par :

- le nombre de tunnels de stockage nécessaires à l'accueil des colis de déchets inventoriés (PIGD), lié notamment aux options de co-stockage et de stockage direct (voir *supra*) ;
- la distance ménagée entre tunnels adjacents ; un entraxe correspondant à cinq diamètres d'alvéole a été retenu pour assurer une indépendance mécanique entre ouvrages³³ ;
- le réseau de galeries d'accès et de retour d'air ; des galeries d'accès « bitubes » ont été définies pour réduire les risques en exploitation et offrir plus de flexibilité sur la gestion de l'installation.

L'étude d'esquisse envisage le creusement de tout ou partie des galeries d'accès orthogonales aux tunnels de stockage par tunnelier « pleine face » (ou « à attaque globale ») avec bouclier et pose d'un revêtement à l'avancement (dans la continuité des descenderies de liaison surface-fond, voir le chapitre 6).

La Laboratoire souterrain apporte une expérience de la réalisation de galeries par attaque ponctuelle dans la direction de la contrainte principale horizontale mineure. Cette expérience est à ce stade plus limitée que celle issue des travaux réalisés dans l'autre direction et présentés *supra* (§ 4.4.1), en matière d'une part de section excavée et d'autre part de diversité de soutènement/revêtement testé. Le soutènement mis en œuvre à ce jour associe un boulonnage des argilites, des cintres et un bétonnage par projection. L'expérience montre que la fracturation des argilites au voisinage d'une galerie orthogonale à la contrainte principale majeure s'exprime principalement en voûte et en sole.

Une galerie parallèle à la contrainte principale majeure a été construite au Laboratoire à l'aide d'un bouclier avec pose à l'avancement d'un revêtement par voussoirs³⁴, sans boulonnage. Les observations montrent une fracturation plus marquée que dans le cas de galeries boulonnées réalisées dans la même direction.

³¹ Également appelées galeries de liaison, mais se distinguant de celles traitées au chapitre 6 par le fait qu'elles sont situées à l'intérieur du quartier.

³² La conception des scellements de tunnels de stockage est considérée à ce stade identique à celle des scellements de galeries de liaison [5].

³³ La stabilité mécanique de chaque ouvrage pris individuellement permet alors d'assurer la stabilité d'ensemble du quartier.

³⁴ Pour le bourrage de l'annulaire voussoirs-roche, un matériau classique et un matériau déformable ont été mis en œuvre successivement dans deux sections distinctes.

Les travaux expérimentaux et numériques sur le comportement hydro-mécanique des galeries ont permis d'apporter des éléments de réponse quant aux modalités de chargement des revêtements/soutènements des galeries d'accès et de retour d'air et de leur comportement à la rupture sous certaines hypothèses. En particulier le comportement de galeries boulonnées implantées orthogonalement aux tunnels de stockage est relativement bien appréhendé par la modélisation³⁵ : les extensions des zones plastiques obtenues numériquement sont proches de celles des zones en extension (EDZ) observées *in situ* (légère surestimation au parement).

4.5.2 Conception de quartier MAVL, démonstration de performance en environnement représentatif (2014-2017 ; TRL 6)

Les principaux enjeux scientifiques et techniques pour l'optimisation de la conception d'un quartier MAVL et la démonstration de ses performances sont les suivants :

- Retard et atténuation de la migration des radionucléides :
 - o Optimisation du niveau d'implantation du quartier dans la partie médiane de la couche du Callovo-Oxfordien, déterminant les épaisseurs des gardes d'argilites sus et sous-jacentes ;
 - o Maîtrise de l'EDZ autour des galeries d'accès et de retour d'air (particulièrement en voûte et en sole), vis-à-vis de la préservation des gardes d'argilites,
 - o Maîtrise des interactions mécaniques entre tunnels de stockage : risque de coalescence des zones endommagées en fonction du rapprochement des alvéoles³⁶, évolution hydromécanique du « pilier » d'argilites entre les alvéoles.
- Limitation du relâchement et immobilisation des radionucléides : maîtrise de l'indépendance physico-chimique des tunnels et des interactions thermiques ;
- Transfert des colis de déchets, capacité à maintenir l'installation souterraine pendant la période d'exploitation, maîtrise des risques en exploitation :
 - o Optimisation des sections utiles et de l'organisation spatiale des différentes galeries pour l'exploitation, ainsi que de la planification de leur construction (avant, pendant et au-delà de la phase industrielle pilote), dans le respect des objectifs de réduction des risques affectant des colis de déchets (incendie...) et de séparation des différentes activités.
 - o Techniques de creusement-soutènement et natures et épaisseurs de revêtement des galeries, en parties courantes et au niveau des intersections, sécurité des chantiers, en particulier vis-à-vis des chutes de blocs en voûte pour les galeries implantées orthogonalement aux tunnels de stockage³⁷, maintenabilité³⁸ mécanique des galeries sur la période d'exploitation (maintien des gabarits, déformations, etc.).

Si la réalisation d'une partie des galeries d'accès et de ventilation est envisagée par attaque ponctuelle avec boulonnage des argilites à l'avancement (à l'instar des tunnels de stockage), l'utilisation d'un tunnelier pleine face pour en réaliser une autre partie, particulièrement celle implantée orthogonalement aux tunnels de stockage, engendre des questionnements technologiques particuliers. La mise en place systématique de boulons, qui limite l'ampleur des déformations de la zone fracturée connectée et

³⁵ Les modèles de comportement actuellement utilisés ne représentent pas explicitement les fractures et tentent de rendre compte implicitement du comportement de la zone endommagée en tant que milieu fracturé.

³⁶ Pour mémoire l'EDZ des tunnels de stockage s'exprime préférentiellement latéralement.

³⁷ En diminuant le jeu des blocs/fractures

³⁸ La maintenabilité d'un élément est son aptitude, dans les conditions d'exploitation, à être maintenu ou rétabli, sur un intervalle de temps donné (ici la durée d'exploitation de Cigéo), dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise (norme NF X 60-010). Pour les galeries de liaison et de retour d'air, elle repose sur la durabilité mécanique des ouvrages, à l'instar des tunnels de stockage, ainsi que sur la possibilité d'envisager une maintenance dans une partie des ouvrages (une maintenance est exclue dans les tunnels de stockage).

apporte à cette zone une certaine cohésion³⁹, apparaît difficile à concilier avec un tunnelier sauf à lui faire perdre tout ou partie de ses bénéfices en matière de cadences d'avancement. Pour soutenir les argilites, le tunnelier utilise un bouclier⁴⁰ et pose le revêtement à l'avancement. L'optimisation de cette technique suppose notamment d'étudier : (i) l'introduction de matériaux déformables à l'extrados et/ou dans le revêtement en béton pour y réduire les contraintes mécaniques⁴¹, (ii) l'effet potentiellement favorable d'une vitesse d'avancement élevée pour limiter l'amplitude des déplacements des blocs d'argilite fracturée jusqu'à leur reprise par le revêtement.

- Aptitude à la fermeture : maîtrise de l'EDZ au droit des scellements de tunnels⁴², compatibilité du revêtement avec une dépose locale (chapitre 7).

Les principales conditions d'environnement à prendre en compte sont :

- la contrainte principale majeure normale à l'axe d'une partie des galeries d'accès et de retour d'air,
- la réponse hydro-mécanique des argilites au creusement des galeries et à la présence des tunnels de stockage ;
- les perturbations physico-chimiques (extension des panaches chimiques dans les argilites, migration via les galeries d'accès et de retour d'air...) et thermiques induites par les déchets stockés dans certains alvéoles ;
- la ventilation des galeries d'accès et de retour d'air pendant la période d'exploitation ;
- l'aléa sismique pendant la période d'exploitation et après fermeture.

Certaines conditions d'environnement peuvent évoluer avec les caractéristiques mécaniques locales des argilites. Par ailleurs les fonctions de sûreté après fermeture (principalement le retard et l'atténuation de la migration) reposent sur les caractéristiques de diffusion et de perméabilité du Callovo-Oxfordien ainsi que sur sa continuité. La continuité et l'adéquation des caractéristiques des argilites à l'intérieur du quartier doivent être vérifiées lors de sa construction, impliquant d'intégrer au chantier de creusement un processus de reconnaissance.

Les travaux menés d'ici à 2017 confèrent le TRL 6 au quartier de stockage.

▪ *Etudes de conception*

Le niveau précis d'implantation de quartier MAVL est défini au plus tard pour l'enclenchement des études d'APD (2015). Ce choix se fonde sur des études de sensibilité des performances en matière de retard et d'atténuation de la migration. Ces études prennent en compte notamment :

- les caractéristiques hydrodynamiques des formations encaissantes, les exutoires respectifs des formations aquifères de l'Oxfordien calcaire et du Dogger, à l'actuel et en fonction de l'évolution géoprospective,
- l'évolution, depuis les dossiers 2005 et 2009, de l'inventaire de Cigéo en produits de fission et d'activation mobiles.

La conception sommaire puis détaillée d'un quartier de stockage réalisée par les maîtrises d'œuvre du projet Cigéo définit en particulier :

³⁹ Les galeries réalisées orthogonalement aux tunnels de stockage se caractérisant par une zone fracturée en voûte, elles sont donc plus sensibles au risque de chute de bloc.

⁴⁰ Le bouclier facilite la sécurité du chantier vis-à-vis du risque de chute de blocs.

⁴¹ L'introduction d'un matériau déformable à l'extrados du revêtement doit prendre en compte les possibilités d'obstruction partielle du jeu entre le revêtement et les argilites par des écailles de roche.

⁴² Conformément à l'engagement pris par l'Andra en 2014 dans le cadre de l'instruction du dossier « ouvrages de fermeture » de montrer « *que l'évolution de ces fracturations dans l'unité silto-carbonatée, le cas échéant, est un phénomène suffisamment maîtrisé pour ne pas remettre en cause la possibilité d'y sceller efficacement les liaisons surface-fond du stockage.* »

- l'architecture du quartier (linéaires de galeries...) et les caractéristiques fonctionnelles et techniques des différentes galeries d'accès, de retour d'air, de recoupe, en tenant compte des voies d'opportunité sur les tunnels de stockage,
- le phasage optimal de réalisation du quartier, décrivant en particulier la part du quartier construite pour la phase industrielle pilote,
- les spécifications des techniques de creusement et de soutènement des différentes galeries, les cadences de creusement associées,
- les matériaux utilisés et le dimensionnement des structures des galeries (revêtements), en tenant compte du mode de creusement/soutènement, de l'aléa sismique pendant la période d'exploitation, etc.
- les dispositions de reconnaissance à l'avancement⁴³.

Comme pour les tunnels de stockage, l'utilisation de l'expérience des grands travaux souterrains, des règles du génie civil et des connaissances issues du Laboratoire en intégrant celles acquises sur la période 2014-2015 (voir *infra*) visent à optimiser le choix des techniques de réalisation des différentes galeries⁴⁴ et leur revêtement de manière à assurer leur maintenabilité mécanique sur la durée d'exploitation.

▪ ***Etudes, essais et recherches sur la construction, la maintenabilité mécanique et l'EDZ des galeries d'accès et de retour d'air.***

Afin de compléter l'expérience acquise au Laboratoire souterrain sur les galeries orthogonales à la contrainte principale majeure, l'Andra prévoit de nouveaux essais au Laboratoire souterrain.

Sur la période 2014-2016, il s'agit de réaliser un tronçon de galerie de section proche de celle des galeries d'accès (GVA1) et de tester différentes rigidités de soutènement-revêtement (projet de galerie GER), sur la base des mêmes techniques que celles déjà mises en œuvre *in situ* dans la direction de la contrainte principale majeure (abattage à l'attaque ponctuelle, soutènement par boulonnage, revêtement par projection ou coffrage de béton). Ces essais comprennent la caractérisation de l'EDZ et le suivi du comportement mécanique des ouvrages. Ils permettent notamment de mieux appréhender l'anisotropie de comportement des argilites⁴⁵.

Sur la période 2016-2018, des essais de mise au point de creusement de galerie d'accès au bouclier contribuent à l'atteinte du TRL6 pour le quartier de stockage avec réalisation partielle au tunnelier, puis apportent les éléments techniques nécessaires pour spécifier les moyens de creusement dont il faudra disposer pour la première tranche de construction de l'installation souterraine de Cigéo. Outre les galeries du quartier MAVL, le domaine d'application de ces essais recouvre aussi les ouvrages de liaison traités au chapitre 6 (⁴⁶). Pour vérifier la constructibilité d'une galerie normale à la contrainte principale majeure à l'aide d'un tunnelier et caractériser l'impact de cette technique sur l'EDZ (tronçon de galerie GVA2), les essais sont effectués à l'image des travaux au bouclier déjà réalisés au Laboratoire dans l'autre direction (la similitude des conditions d'essais permettant d'analyser

⁴³ Dans son rapport d'évaluation n°7 (novembre 2013), la CNE « estime que l'on ne progressera plus notablement dans la connaissance des propriétés de la Zira avant un accès direct au COx par les puits et galeries de la tranche 1 de Cigéo. Ce creusement sera l'occasion de confirmer le modèle géologique pour la Zira. La Commission recommande que l'Andra définisse le programme d'accompagnement scientifique et technique prévu pendant la réalisation des travaux de la tranche 1. Ce programme visera à préciser, pour la Zira, les valeurs des paramètres du Cox. L'Andra devra définir les moyens mis en œuvre pour identifier au cours du creusement les éventuelles hétérogénéités géologiques. Elle devra également indiquer la stratégie qu'elle envisage d'adopter pour prendre en compte les nouveaux résultats qui pourraient apparaître. »

⁴⁴ Conformément à l'engagement pris par l'Andra dans sa lettre du 16 novembre 2011 relative à l'instruction du Dossier 2009 de présenter « une analyse comparative des techniques de creusement intégrant notamment le retour d'expérience issu du Laboratoire souterrain » et de justifier « sur cette base, celles qui seront retenues pour le creusement des ouvrages du futur stockage. »

⁴⁵ Cela répond à la demande de l'ASN dans son avis du 1^{er} juin 2011 relatif à l'instruction du Dossier 2009 d'améliorer « la compréhension du comportement mécanique de la roche, notamment en lien avec les techniques de creusement, et des couplages entre les différents phénomènes ».

⁴⁶ Ces essais répondent à la demande de l'ASN « de définir pour la demande d'autorisation de création, si cette solution de creusement est retenue, le ou les points d'arrêt et les investigations nécessaires permettant de s'assurer de l'absence d'effets réducteurs du creusement sur les ouvrages souterrains et les équipements ».

l'influence de l'anisotropie de comportement des argilites) ; dans un deuxième temps, les essais peuvent également intégrer des solutions techniques particulières étudiées par les maîtrises d'œuvre en phase d'APD (2017-2018). Enfin des essais spécifiques (potentiellement à petite échelle) peuvent évaluer l'influence de la vitesse d'avancement du bouclier sur l'écaillage notamment en voûte⁴⁷ et sur la facilité de pose du revêtement.

Les mesures de contraintes et de déformations dans les revêtements sont comparées avec celles issues des ouvrages déjà réalisés au Laboratoire : la diversité des situations géotechniques couvertes permet de mieux dé-corréler, dans le chargement mécanique des revêtements, les rôles respectifs des contraintes et de la déformabilité des matériaux se trouvant en contact avec le revêtement (matériaux de bourrage ou argilites fracturées). Ces résultats contribueront à prolonger l'optimisation de la conception des soutènements-revêtements de l'installation souterraine de Cigéo (épaisseur, rigidité) dans les étapes suivantes du projet.

La tenue mécanique des galeries sur la période d'exploitation est démontrée en conditions d'environnement représentatives en associant les observations au Laboratoire souterrain et des simulations numériques permettant de transposer les échelles de temps et d'espace. Il s'agit d'analyser le comportement mécanique dans le temps des soutènements/revêtements, au niveau des sections courantes et des intersections d'ouvrages. En lien avec le retour d'expérience des galeries creusées au Laboratoire souterrain et de l'expérimentation de soutènement avec béton projeté épais (BPE, galerie GCS), les simulations permettent d'affiner les connaissances du comportement mécanique intrinsèque des soutènements-revêtements soumis aux différentes modalités de chargement en termes de déformations/contraintes, en distinguant l'orientation et le mode de réalisation de chaque type de galerie. Les processus de fissuration/fracturation du béton sont analysés finement. Pour cela, les modèles de comportement développés pour les bétons sont utilisés et intègrent notamment le fluage. Ces modélisations prennent en compte les effets des évolutions chimiques et la présence d'armatures⁴⁸. Les évolutions chimiques sont évaluées à partir d'une modélisation de l'évolution hydrique des bétons reliée à la ventilation des galeries. L'utilisation des modèles couplés chimie-mécanique intégrant les évolutions chimiques de manière continue permet de préciser leur impact sur le comportement de la structure. Les modélisations rendent compte également du rôle mécanique des matériaux déformables intégrés au revêtement.

Les simulations de l'extension et de l'évolution à long terme de la zone endommagée autour des différents types de galeries d'accès et de retour d'air définis dans le cadre des études d'avant-projet s'appuient sur les développements en matière de modélisation mécanique présentés plus haut pour les tunnels de stockage, et s'effectuent en lien avec les travaux sur les remblais.

▪ ***Etudes et recherches sur les interactions chimiques entre alvéoles MAVL***

Pour démontrer l'indépendance chimique des différents tunnels de stockage, les travaux de simulation numérique évaluent l'extension des panaches chimiques et radiologiques et identifient pour les conditions salines spécifiques de certains déchets les conditions d'interactions possibles avec les alvéoles adjacents. Ces travaux s'appuient sur les actions de R&D en physico-chimie déjà mentionnées au § 4.4.2.

▪ ***Simulations des interactions thermiques à grande échelle***

Les interactions thermiques entre les alvéoles contenant des colis de déchets faiblement exothermiques sont prises en compte dans les études d'avant-projet des tunnels de stockage (§ 4.4).

Des modélisations thermiques à grande échelle sur la base de l'APD de Cigéo visent à vérifier que la charge thermique issue des alvéoles MAVL faiblement exothermiques ou même des quartiers HA n'est pas de nature à créer des interactions thermiques à distance excédant les critères thermiques spécifiés.

⁴⁷ Une grande part des galeries étant creusées dans l'axe de la contrainte principale horizontale mineure

⁴⁸ Conséquences des armatures sur le comportement mécanique de l'ouvrage avant corrosion, impact de la corrosion des armatures sur le comportement mécanique des structures (fissuration), mais également sur le comportement post-fissuration des structures.

▪ **Etudes et recherches sur les interactions hydro-mécaniques à l'échelle du quartier**

Les simulations hydro-mécaniques à l'échelle du quartier vérifient le comportement des piliers entre tunnels de stockage, sur la base des dimensionnements d'alvéoles ressortant des études d'APS puis d'APD. A l'échelle de la période d'exploitation, il s'agit de s'assurer du caractère limité des interactions mécaniques. A long terme, il s'agit de vérifier que d'éventuelles interactions ne perturbent pas la garde d'argilites retardant et atténuant la migration des radionucléides, en tenant compte notamment des taux de vides résiduels dans les alvéoles. Ces simulations s'appuient sur les résultats des recherches en matière de modélisation du comportement hydro-mécanique des argilites.

Un cas particulier des études à long terme porte sur l'effet du gonflement des boues bitumées par reprise d'eau sur le comportement mécanique global de l'alvéole MAVL, sur le comportement et l'évolution de la zone de fracturation autour de l'alvéole et *in fine* sur le comportement du pilier entre tunnels.

4.5.3 Démonstration de la performance du quartier en environnement opérationnel (2017-2024 ; TRL 7)

Les travaux planifiés entre 2017 et 2024 sur le quartier de stockage visent à compléter ceux envisagés plus haut sur le tunnel de stockage pour atteindre le TRL 7 avant le démarrage de la phase industrielle pilote.

Maintenabilité mécanique et EDZ des galeries d'accès et de retour d'air

Selon les options techniques retenues dans le cadre de l'APD, l'objectif du TRL 7 peut conduire, à l'instar du tunnel de stockage (§ 4.4.2.1), à réaliser un ou plusieurs ouvrages d'essais au Laboratoire souterrain aussi représentatifs que possible de la conception des galeries d'accès et/ou des intersections (même section, même conception, même dimensionnement) : orientation suivant les directions de contraintes principales horizontales mineure et/ou majeure et éventuellement dans des directions intermédiaires représentatives par exemple des virages effectués avec un tunnelier ; technique de réalisation et mode de revêtement. Le besoin de réaliser de tels essais et les configurations à tester sont instruits à l'issue des études d'APD, en fonction des limites des démonstrations apportées par les ouvrages expérimentaux réalisés antérieurement au Laboratoire (en matière de représentativité de la conception et de reproduction des conditions d'environnement opérationnelles). Le cas échéant, l'EDZ autour de ces nouveaux ouvrages est caractérisé et son évolution suivie.

Comme pour le tunnel de stockage, les simulations numériques des performances mécaniques des galeries sur la durée d'exploitation et après fermeture (évolution de l'EDZ) sont mises à jour en intégrant les résultats de l'observation des ouvrages d'essai du Laboratoire et la poursuite des développements de la modélisation du comportement mécanique des argilites.

Comportement phénoménologique à l'échelle du quartier

Les simulations des interactions phénoménologiques entre tunnels de stockage effectuées pour le TRL 6 sont mises à jour pour le TRL 7 sur la base des résultats des recherches et développements sur le comportement hydro-mécanique des argilites et sur les processus physico-chimiques dans les tunnels de stockage.

Ces mises à jour permettent de mieux évaluer les marges de dimensionnement disponibles sur les distances entre alvéoles et ouvrent ainsi la possibilité d'optimiser ces dernières dans les étapes suivantes, notamment pour la voie d'opportunité consistant à augmenter les sections des tunnels (115 m²).

4.5.4 Qualification et mise en œuvre (TRL 8, TRL 9)

La construction de la première tranche de quartier MAVL est enclenchée après la mise à disposition d'ouvrages de liaison avec la surface. Elle aura nécessité au préalable une préparation de moyens industriels. Celle-ci concerne notamment :

- La fabrication de matériels de travaux spécifiques⁴⁹ ;
- La mise en place de la chaîne d'approvisionnement en matériaux de construction et le cas échéant, de préfabrication d'éléments de structure (voussoirs en béton notamment). Dans le cas d'une préfabrication d'éléments contribuant à la maintenabilité mécanique des galeries, des modalités d'essais de convenance comparables à celles décrites pour la préfabrication des conteneurs de stockage sont à prévoir (§ 4.3).

Certains de ces moyens industriels pourront avoir été utilisés auparavant pour la construction d'ouvrages de liaison, impliquant leur disponibilité à partir de 2020.

Comme pour les tunnels de stockage, l'atteinte du TRL 8 est sous-tendue par la recette des ouvrages du quartier réalisés avant la mise en service de Cigéo et les tests inactifs en conditions réelles sous-tendent, celle du TRL9 par le chargement des premiers tunnels de stockage et l'observation de l'évolution des galeries d'accès et du quartier en situation réelle. La construction de nouveaux tunnels de stockage pendant la poursuite du chargement des premiers réalisés (§ 4.4) permet de valider la séparation des activités (voir aussi *infra*).

L'expérience acquise par l'observation des ouvrages pendant la phase industrielle pilote et poursuivie au-delà, complétée si nécessaire de nouveaux essais (réalisés en zone conventionnelle) préparent l'optimisation de la conception des tranches suivantes du quartier.

⁴⁹ *i.e.* non disponibles sur catalogue ou sur parc

Déroulement des travaux sur le quartier de stockage MAVL

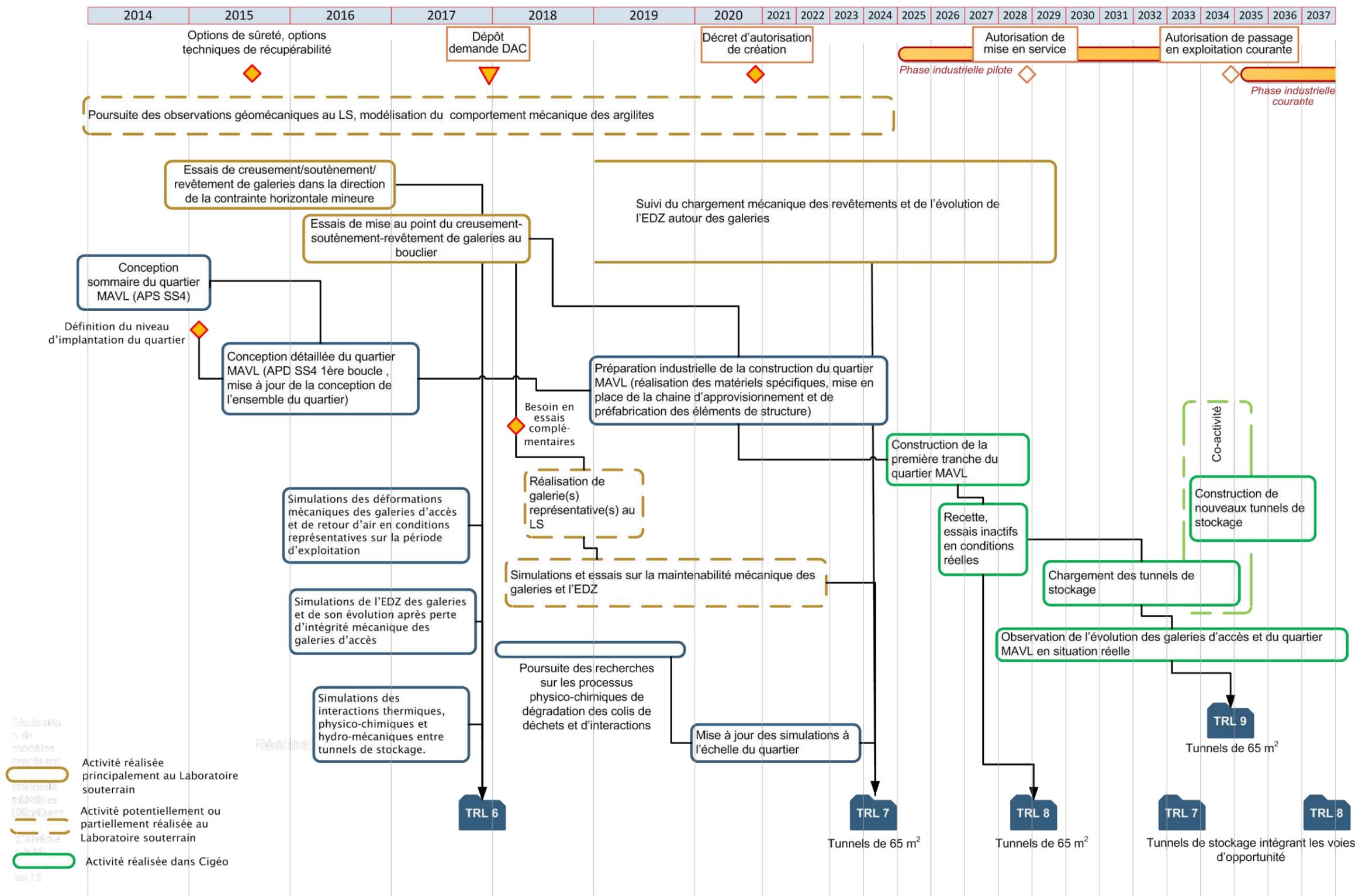


Figure 4.5-1 Logigramme des études et travaux sur le quartier de stockage des déchets MAVL d'ici au passage à l'exploitation industrielle courante de Cigéo

4.6 Moyens d'exploitation

4.6.1 Moyens de mise en place et retrait des colis de déchets dans les alvéoles

Etat des lieux

Plusieurs techniques de mise en place et de retrait de colis de stockage ont été étudiées, adaptées à leurs masses, leurs dimensions et aux caractéristiques géométrique des tunnels de stockage; la faisabilité de ces procédés de manutention est démontrée sur la base des études réalisées⁵⁰ et de l'expérience industrielle.

Si la manutention de colis primaires sans conteneur de stockage bénéficie de l'expérience industrielle des installations nucléaires existantes de production et d'entreposage, les procédés de mise en place et de retrait de colis primaires en tunnel de stockage ont été jusqu'ici moins approfondis que pour les colis de stockage.

2014-2017 (TRL 6, niveau 2)

Les conditions d'environnement des systèmes de mise en place et de retrait de colis sont caractérisées par les travaux décrits plus haut sur les conteneurs et tunnels de stockage (§ 4.4) :

- température et hygrométrie dans les alvéoles et les galeries d'accès⁵¹ ;
- masses et géométries des colis primaires ou de stockage à manutentionner ;
- gabarit limité des galeries d'accès et des tunnels de stockage ; tolérances géométriques (pour la mise en place et le retrait des colis de déchets) ;
- débit de dose (induisant des besoins en radioprotection et impactant le vieillissement des matériels).

En outre, l'éventualité d'une contamination labile sur les colis est prise en compte dans le cadre d'une situation incidentelle hypothétique⁵².

Les maîtrises d'œuvre sont chargées de définir les systèmes de mise en place et de retrait au stade de l'APS en 2015 puis de l'APD en 2017. Pour statuer en 2015 sur la voie d'opportunité consistant à mettre en alvéole des colis primaires sans conteneur de stockage (§ 4.4), les études d'APS complètent l'évaluation de la faisabilité de cette voie et amènent au même niveau de définition les systèmes de manutention pour les colis primaires et pour les colis de stockage.

Afin d'atteindre le TRL 6 d'ici 2017, ces études sont complétées par une campagne d'essais de démonstration de la capacité à reprendre des colis de stockage dans un environnement représentatif des configurations géométriques possibles suite aux déformations d'une pile au sein de l'alvéole. Cette campagne utilise un chariot à fourches télescopiques dont les degrés de liberté sont adaptés à une telle opération de retrait.

Si les conditions d'environnement reproduites par ces essais de reprise de colis portent tout autant sur le niveau 2 que sur le niveau 3 de récupérabilité, une démonstration complète de la capacité de retrait au niveau 3 nécessite aussi celle de l'évacuation des gaz accumulés, de la déconstruction des scellements et de la remise de l'alvéole en configuration d'exploitation (voir *infra*).

⁵⁰ Pour mémoire la technique du « pré-empilage » en tête d'alvéole a fait l'objet d'essais ; cette technique fut étudiée spécifiquement pour la manutention de colis de stockage de grandes dimensions, qui ne sont plus considérés aujourd'hui dans le cadre du projet.

⁵¹ Dans les tunnels de stockage en situation d'exploitation, la température est limitée par la ventilation et le dimensionnement à 50 °C ; l'hygrométrie est normalement de l'ordre de 60 à 70 % [5].

⁵² Cette éventualité amène à prévoir des dispositions conservatoires pour l'intégration de moyens de contrôle de la contamination, et éventuellement de dispositifs de préparation au transfert, en cellule de manutention, avant transfert hors du tunnel de stockage. Les études d'APD à échéance 2017 traitent ces dispositions.

2017-2022 (TRL 7, niveau 2)

Selon le niveau de couverture, par l'expérience industrielle, des solutions techniques retenues dans le cadre des études d'APD, il peut être pertinent d'amener les composantes sensibles des systèmes de mise en place et de retrait au TRL 7 avant d'installer les équipements réels dans l'installation souterraine de Cigéo⁵³. La confirmation de cet objectif et le choix des composantes à tester se fondent sur les études d'APD à l'horizon 2016/2017.

Le cas échéant, les essais correspondants s'attachent à vérifier la sûreté des opérations de mise en place et de retrait de colis au regard des risques d'incendie, de chute et de collision (en cohérence avec l'analyse des risques réalisée dans le cadre des études d'APD), ainsi que les procédures de maintenance préventive, curative et d'intervention.

Les essais reproduisent les conditions d'environnement opérationnelles, notamment le gabarit des ouvrages et les différents types de défauts géométriques envisagés. Dans le cas d'un pont gerbeur/stockeur, les hauteurs de gerbage correspondent à la voie d'opportunité d'augmentation de la section des tunnels (115 m²), anticipant sur la mise en œuvre de cette voie et contribuant à la qualifier.

Pour reproduire certaines conditions d'environnement, la programmation des essais prend en compte la possibilité d'utiliser le tunnel représentatif construit en 2018-2019 au Laboratoire souterrain. Si cette possibilité est retenue, les besoins correspondants sont alors intégrés à la préparation de la construction de ce tunnel.

2025-2035 (TRL 8/TRL 9, niveau 2)

Les équipements réels de mise en place et de retrait des colis de déchets prévus d'être stockés durant la phase industrielle pilote font l'objet d'essais en inactif, d'abord dans les locaux des fournisseurs, puis *in situ* dans l'installation souterraine de Cigéo (TRL 8).

L'exploitation industrielle pilote de Cigéo comprend la mise en stockage de colis MAVL ainsi que des démonstrations de retrait de colis réel (au niveau 2 de récupérabilité). La première démonstration de retrait s'effectue dans la période des essais de démarrage en actif de l'installation.

Le retour d'expérience de la phase industrielle pilote confère aux techniques de manutention mises en œuvre durant cette phase le TRL 9.

4.6.2 Moyens de surveillance

Les maîtrises d'œuvre définissent le programme de surveillance de Cigéo pour la sûreté des opérations d'exploitation, sur la base des analyses de risques menées dans le cadre des études d'avant-projet. La détermination des paramètres à surveiller vis-à-vis de la récupérabilité des colis de déchets au cours de la période d'exploitation et de la sûreté après-fermeture relève de l'Andra, en entrée aux études d'APS puis d'APD. Sur ces bases, les maîtrises d'œuvre sont chargées de définir les moyens de surveillance installés dans Cigéo.

En sus de l'instrumentation fixe *in situ* des ouvrages, les maîtrises d'œuvre assurent la conception sommaire (2015) puis détaillée (2017) d'un dispositif téléopéré d'inspection de chaque tunnel de stockage sur toute sa longueur, maintenu opérationnel jusqu'à la fermeture du tunnel. Dans le cadre des études d'avant-projet, ils intègrent ce dispositif dans la définition du tunnel (les conditions d'environnement de ce dispositif sont similaires aux moyens de mise en place et de retrait des colis de déchets, voir *supra*).

⁵³ Dans le cadre de l'instruction, par l'ASN, du dossier 2009, l'IRSN a exprimé le point de vue suivant sur d'éventuels essais de manutention [réf. IRSN/2010-00002] : « *l'IRSN soulignait, à l'occasion de l'instruction du dossier 2005, un besoin important de valider les concepts présentés par des prototypes ou des maquettes à une échelle transposable, dans l'optique de passer du stade des études à celui de la mise en œuvre effective d'une installation industrielle. A ce jour, le dossier 2009 présente une plus grande variété de procédés de mise en alvéole de colis de stockage MAVL que dans le dossier 2005, mais les études d'ingénierie n'ont pas encore débouché sur la création de prototypes ou de maquettes permettant de les valider sur le plan industriel.* »

Etat des lieux

L'Andra a choisi dès 2008 de développer très en amont la démonstration de durabilité, de fiabilité et de certification d'instruments de mesure innovants, et ainsi d'initier la qualification de ces technologies⁵⁴. Ces travaux de R&D ont anticipé la conception du système de surveillance et peuvent ainsi apporter aux maîtrises d'œuvre de nouvelles solutions techniques pour les études d'avant-projet, en complément de la gamme d'instruments déjà commercialisés. Ces développements préparent aussi l'instrumentation des ouvrages d'observation, particulièrement dans le cadre de la phase industrielle pilote⁵⁵ (voir les tunnels d'observation au § 4.4).

Des premiers essais ont été menés depuis 2011 au Laboratoire souterrain. Ainsi, au sein de l'expérimentation ORS (revêtement coulé en place), la première section instrumentée a donné satisfaction notamment à travers un taux de survie des capteurs proche de 100 %.

Aujourd'hui les principes de mesure T-H-M possèdent dans leur majorité un TRL 5 voire au-delà, alors que les systèmes de suivi pérenne des gaz (qui pourraient compléter le suivi réalisé par piquage sur la ventilation) qui seraient déployés au sein des alvéoles sont à un stade plus amont de maturité (TRL 3 à TRL 4).

L'Andra fournit un état de l'art en instrumentation aux maîtrises d'œuvre en début de phase APS, sous la forme d'un inventaire de solutions techniques possibles. Une mise à jour est prévue pour le lancement des études d'APD. Les perspectives de disponibilité des technologies innovantes (si non leur faisabilité très prochaine) sont évaluées.

Qualification

Les technologies innovantes susceptibles d'être mises en œuvre dans le cadre de la phase industrielle pilote pour la surveillance, l'instrumentation et l'inspection des alvéoles d'observation actifs, visent un $TRL \geq 6$ à l'horizon 2017. Cela implique des essais dans des conditions d'environnement représentatives, notamment au Laboratoire souterrain : ainsi l'essai GER comprend en 2015 une instrumentation complète. En parallèle des tests de durcissement aux radiations sont réalisés sur les instruments envisagés d'être placés à l'intérieur d'alvéoles.

Entre 2018 et 2025, les essais envisagés plus haut sur les tunnels de stockage, galeries d'accès et systèmes de mise en place et retrait constituent des bancs de test en conditions d'environnement opérationnelles pour les instruments et le dispositif d'inspection retenus à l'issue des études d'APD, avant leur installation dans Cigéo pour la phase industrielle pilote. Ces essais permettent globalement de mettre en pratique les développements sur la gestion et la fusion des données.

Recherche et développement de nouveaux moyens de monitoring

Paragraphe complété dans une version ultérieure.

4.6.3 Autres moyens techniques d'exploitation de quartier MAVL au niveau 2 de récupérabilité

De même que pour les techniques de mise en place et de retrait, les maîtrises d'œuvre définissent l'ensemble des autres moyens d'exploitation dans le cadre des études d'APS et D'APD (2014-2017). Il s'agit de tous les équipements nécessaires au soutien des opérations de mise en place et retrait de colis de déchets, au maintien de l'installation au niveau 2 de récupérabilité puis au soutien des opérations de fermeture d'alvéole : ventilation, dispositifs fixes et mobiles de radioprotection, dispositifs de séparation des différents types d'activités... Les études comprennent une comparaison de plusieurs possibilités de zonage radiologique du quartier et une démarche d'optimisation de la

⁵⁴ L'approche menée et qui se poursuit actuellement s'est attachée à développer et à mettre en place une méthodologie systématique, afin de qualifier et valider l'ensemble des systèmes retenus ou développés, sur la base de principes durables de détection ou de mesure pour toutes les grandeurs d'intérêt (T-H-M-C), en adaptant ou développant un principe physique ou chimique de manière à élaborer un système de mesure (capteur ou élément mobilisable) compatible avec les conditions du stockage.

⁵⁵ En sus de la surveillance de l'installation, l'instrumentation des ouvrages d'observation apporte une expérience et des connaissances complémentaires en vue notamment de l'optimisation des tranches suivantes de Cigéo.

radioprotection⁵⁶ [5]. Les moyens techniques à définir bénéficient en général d'un retour d'expérience suffisant de l'industrie pour ne pas nécessiter d'essais particuliers en vue du TRL 6 (2017).

Pour démontrer la capacité de la ventilation des tunnels de stockage à évacuer la chaleur et les gaz de radiolyse et à y tamponner l'hygrométrie, les études des maîtrises d'œuvre sont complétées d'ici 2017 par des modélisations dans les situations normale et incidentelles⁵⁷ d'exploitation et lors des opérations de fermeture : évaluation fine et quantitative de l'évolution de la concentration en hydrogène, vérification de l'absence de risque d'atmosphère explosive (ATEX)... Fondées sur la description des solutions techniques définies par les maîtrises d'œuvre dans le cadre de l'APS, ces modélisations représentent le plus fidèlement possible les phénomènes mis en jeu afin de dégager des marges (incertitudes comprises) par rapport aux méthodes plus pénalisantes utilisées classiquement pour le dimensionnement⁵⁸.

A l'instar de la mise en place et du retrait, le choix d'amener certaines techniques au TRL 7 avant d'équiper l'installation souterraine de Cigéo s'effectue à l'horizon 2016/2017 au regard des solutions techniques définies en phase d'APD ainsi que des résultats de modélisation de la ventilation. Un programme d'essais est alors être mis en place si nécessaire.

L'atteinte des TRL 8 et 9 s'effectue dans le cadre de la phase industrielle pilote de la même façon que pour les techniques de mise en place et de retrait. Les performances des dispositifs de radioprotection sont vérifiées au moyen de sources radioactives scellées lors des essais inactifs de cette phase, avant l'introduction de colis de déchets réels dans l'installation.

4.6.4 Moyens techniques spécifiques au niveau 3 de récupérabilité

Les techniques d'évacuation des gaz, de déconstruction des scellements et de remise de l'alvéole en configuration d'exploitation sûre, préalablement à un retrait de colis de déchets au niveau 3, sont étudiées par les maîtrises d'œuvre dans le cadre des études d'avant-projet.

Outre les déformations mécaniques potentielles mentionnées plus haut pour les techniques de retrait, les conditions d'environnement spécifiques à considérer au niveau 3 concernent les gaz accumulés dans les alvéoles (particulièrement l'hydrogène formé par radiolyse et par corrosion anoxique), l'état hydrique dans l'alvéole et la température⁵⁹.

Ces conditions sont caractérisées par la modélisation. Jusqu'ici, en lien avec l'état des connaissances, les études ont considéré une production constante d'hydrogène par radiolyse et une production par corrosion qui ne tenait pas compte des conditions d'environnement hydraulique/hydrique. Les études plus poussées visent d'ici 2017 à intégrer l'effet de la décroissance radioactive dans les mécanismes de production d'hydrogène par radiolyse et l'effet des conditions hydriques sur la production d'hydrogène par corrosion anoxique.

L'approfondissement des études des techniques préalables à un retrait au niveau 3, leur mise au point et des essais en conditions représentatives visent le TRL 6 l'horizon 2021/2022. Les conditions d'environnement particulières justifient ensuite de rechercher le TRL 7, ce qui peut impliquer des essais spécifiques, en lien avec ceux concernant la capacité à fermer les tunnels de stockage (§ 4.4). L'obtention du TRL 7 pendant la phase d'exploitation industrielle pilote de Cigéo ouvre la possibilité de fermer de premiers alvéoles à l'issue de cette phase tout en ayant suffisamment qualifié les techniques de retrait après cette fermeture.

⁵⁶ En application du principe ALARA

⁵⁷ Reprise de ventilation après un arrêt temporaire

⁵⁸ Des efforts importants ont été engagés pour caractériser le devenir de l'hydrogène : (i) description plus précise et quantifiée de la production et du devenir de l'hydrogène, (ii) définition du couplage entre la ventilation, la production et la migration de l'hydrogène et l'état hydrique/hydraulique de l'alvéole ou du colis jusqu'au quartier de stockage.

⁵⁹ Jusqu'à 65 °C [5]

Déroulement des travaux sur l'exploitation du quartier de stockage MAVL

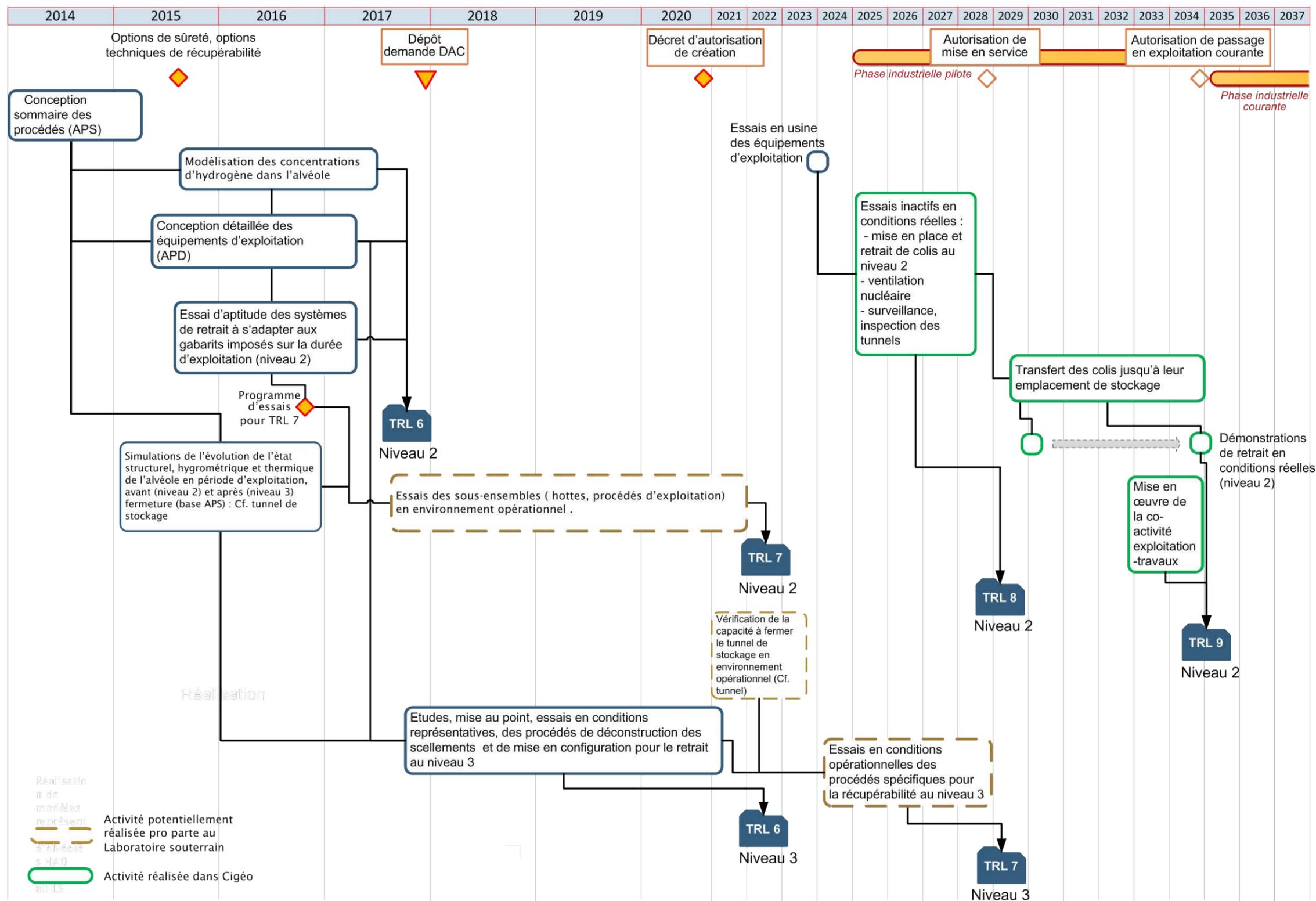


Figure 4.6-1 Logigramme des études et travaux sur l'exploitation du quartier de stockage des déchets MAVL d'ici au passage à l'exploitation industrielle courante de Cigéo

5. Quartiers, micro-tunnels et conteneurs de stockage de déchets HA

Ce chapitre couvre les conteneurs de stockage de déchets HA, les alvéoles de stockage de ces déchets ainsi que les quartiers de stockage correspondants. Un quartier comprend, outre les alvéoles, les galeries d'accès aux alvéoles et leurs recoupes. Il se caractérise notamment par les distances entre alvéoles. Ce chapitre traite aussi les procédés de mise en place et retrait des colis ainsi que les moyens de surveillance implantés dans les alvéoles et les quartiers.

5.1 Solutions techniques étudiées

Le stockage des colis de déchets HA est prévu en micro-tunnels horizontaux implantés en partie centrale de la couche argileuse du Callovo-Oxfordien, afin d'exploiter au mieux l'épaisseur de cette couche de part et d'autre du quartier de stockage pour retarder et atténuer la migration des radionucléides et toxiques chimiques, et de dissiper la chaleur dégagée par les déchets tout en optimisant les coûts.

Les micro-tunnels sont composés d'une partie utile pour l'accueil des colis de déchets – également appelée corps d'alvéole - et d'une tête assurant l'interface avec la galerie d'accès. La solution de référence correspond à des micro-tunnels « borgnes^{60 61}».

Le dispositif retenu en référence pour la mise en place des colis de stockage dans l'alvéole consiste en l'utilisation d'un robot pousseur. Il est possible de le retirer de l'alvéole à l'aide du même robot. Des équipements spécifiques au retrait sont également envisagés, en lien notamment avec un scénario hypothétique de retrait d'un grand nombre de colis⁶².

La longueur des alvéoles doit être la plus grande possible pour des raisons de retard et d'atténuation de la migration des radionucléides et pour des raisons économiques. Les études et essais réalisés à ce stade ont démontré, en conditions représentatives, la faisabilité de la réalisation de micro-tunnels et de la manutention horizontale de colis de déchets jusqu'à une longueur de 100 m (atteinte du TRL 5). Des longueurs de 80 m pour les micro-tunnels de déchets moyennement exothermiques (HAO) stockés dès la phase industrielle pilote et de 100 m pour les déchets fortement exothermiques prévus d'être stockés au-delà de 2075 sont retenus en référence.

Une voie d'optimisation est de porter la longueur utile des alvéoles de déchets fortement exothermiques jusqu'à 150 m, sachant que la faisabilité n'en a pas été démontrée à ce stade (TRL4).

Un acier pétrolier de nuance API5LX65 MS a été retenu pour chemiser les alvéoles en partie utile comme en tête. L'épaisseur de référence⁶³ est de 25 mm (⁶⁴). L'Andra étudie le remplissage de l'espace annulaire entre le chemisage et les argilites par un matériau ayant pour fonction de tamponner le pH, et dont les caractéristiques précises restent à fixer.

Le colis de stockage de déchets HA comprend un colis primaire⁶⁵ (matrice de verre et conteneur en acier) et un surconteneur en acier (épaisseur de l'ordre de 65 mm prise comme référence) équipé de patins de glissement en céramique industrielle. Plusieurs nuances d'acier candidates sont encore à l'étude, en visant une ductilité élevée et une insensibilité à la corrosion sous contrainte. Pour les surconteneurs de déchets moyennement exothermiques stockés dès la phase industrielle pilote, une

⁶⁰ Des alvéoles borgnes ne débouchent sur une galerie que d'un seul côté.

⁶¹ Conformément aux recommandations de la CNE [Cf. Rapport d'évaluation n°6 - Commission nationale d'évaluation des recherches et études relatives à la gestion des matières et des déchets radioactifs - Novembre 2012]

⁶² Ces dispositifs pourront être de type robot récupérateur (par exemple grappin motorisé) associé à un système de treuil externe à l'alvéole, monté sur une hotte adaptée

⁶³ Il s'agit de la valeur haute d'épaisseur couverte par la norme industrielle API.

⁶⁴ Compte tenu des incertitudes actuelles, la possibilité d'augmenter cette épaisseur jusqu'à 35 mm est aussi considérée.

⁶⁵ Les caractéristiques du colis primaire constituent une donnée d'entrée de la conception notamment du surconteneur et du chemisage. A la mise en exploitation de Cigéo, le colis primaire fourni par le producteur devra répondre aux spécifications d'acceptation produites par l'Andra.

voie d'opportunité consisterait à diminuer l'épaisseur d'acier du fait des exigences moindres notamment vis-à-vis de la durée de la phase thermique et de la radio-toxicité potentielle pour certaines familles. Ceci diminuerait la masse des colis de stockage à manutentionner, le terme source d'hydrogène produit après-fermeture par corrosion en conditions anoxiques et les coûts.

Pour les surconteneurs fortement exothermiques, une alternative consiste à utiliser des matériaux non ferreux (par exemple des céramiques). La faisabilité de cette alternative n'est pas démontrée à ce stade (TRL2).

L'espacement des colis fortement exothermiques dans les micro-tunnels, l'espacement des micro-tunnels entre eux ainsi que leur longueur impactent la densité de la charge thermique. L'espacement entre des colis de déchets exothermiques est à ce stade géré dans la solution de référence par la mise en place d'intercalaires avec paroi en acier. Pour les colis HA moyennement exothermiques, la mise en place d'intercalaires n'est pas nécessaire.

Certains colis de déchets MAVL pourront être stockés dans des micro-tunnels, servant d'intercalaires entre des colis HA voire seuls. Cette possibilité concerne d'une part des colis de déchets MAVL vitrifiés type CSD-B et, d'autre part, des colis des déchets de structure compactés dépourvus de matière organique (CSD-C).

L'étude d'esquisse industrielle de Cigéo prévoit de réaliser les galeries d'accès aux alvéoles de stockage de déchets moyennement exothermiques à la machine à attaque ponctuelle (dès la phase industrielle pilote). En l'état actuel des techniques, la construction des galeries d'accès aux alvéoles de déchets fortement exothermiques est envisageable de la même façon ou au tunnelier (à l'horizon 2075).

5.2 Fonctions et exigences

Sur la base des exigences applicables au projet Cigéo [5], cette section synthétise les fonctions critiques et les principales exigences de performance à atteindre pour les différents éléments considérés.

5.2.1 Fonctions après-fermeture

Limiter le relâchement des radionucléides et toxiques chimiques et les immobiliser dans le stockage

La fonction critique du conteneur de stockage est de retarder l'arrivée d'eau sur les déchets. Il faut noter que le chemisage, *via* sa fonction critique de soutien mécanique de l'alvéole, protège mécaniquement le conteneur pendant une première phase,

L'exigence de performance est une durabilité de l'étanchéité à l'eau du conteneur aussi longue que possible sur la base des meilleures techniques disponibles, respectant a minima les contraintes suivantes : (i) la température de l'eau qui arrivera au contact d'un verre chaud doit être inférieure à 50 °C pour les colis de déchets qui seront livrés avant 2075 et 70 °C pour ceux qui seront livrés au-delà de 2075 ⁽⁶⁶⁾ ; (ii) la radiotoxicité des substances radioactives aura suffisamment décré. A titre de précaution, une valeur alternative de la contrainte de température pour les déchets livrés après 2075 est prise égale à 60 °C. Cette contrainte de température sur le verre nucléaire peut conduire à adapter la densité thermique des quartiers de stockage à la durabilité évaluée du conteneur (voir aussi la section 5.5) [5]. En plus du respect des contraintes de température, on cherche à limiter la masse résiduelle de fer encore présente sous forme métallique dans l'alvéole au moment de l'arrivée d'eau sur le verre nucléaire, dans l'objectif de réduire les perturbations induites sur l'altération aqueuse du verre.

Malgré les différences de contraintes thermiques applicables respectivement aux déchets moyennement et fortement exothermiques, les durées des phases thermiques sont plus brèves pour

⁶⁶ Pour les colis de déchets qui seront livrés au-delà de 2075, l'acquisition des connaissances sur la dissolution des verres nucléaires en température est poursuivie dans le cadre du programme de recherche et développement de manière à maîtriser le comportement du verre nucléaire dans le domaine de température 50 °C - 70 °C. Les connaissances disponibles sur le comportement du verre en température ne font pas apparaître d'effet de seuil jusqu'à 70 °C au moins.

les premiers que pour les seconds, d'où une exigence de performance moindre pour les déchets stockés avant 2075.

Retarder et atténuer la migration des radionucléides et toxiques chimiques (après fermeture et perte d'intégrité du conteneur)

Les alvéoles contribuent à retarder et atténuer la migration des radionucléides et toxiques chimiques en mobilisant préférentiellement la voie de transfert par le Callovo-Oxfordien plutôt que la voie de transfert longitudinale par les alvéoles, les galeries d'accès et les ouvrages de liaison. Pour cela leur longueur est la plus grande possible, sous réserve de la démonstration technologique de leur construction et de leur exploitation (voir supra).

Maîtrise des perturbations THMCR

Les matériaux et composants utilisés dans le stockage ne doivent pas être préjudiciables aux fonctions de sûreté, notamment celles assurées par les colis et la roche hôte.

Ceci se traduit par le fait que les conditions induites au sein du stockage doivent rester dans un domaine permettant de maîtriser chaque processus pris séparément (thermique, hydraulique, mécanique, chimique, radiologique) et de rendre compte des couplages et des interactions. L'ensemble de l'environnement opérationnel (conditions naturelles et induites) est pris en compte pour valider la performance des composants de Cigéo lors du passage des niveaux de l'échelle TRL.

Pour limiter les perturbations d'origine thermique, la chaleur produite par la radioactivité des déchets sera dissipée de manière passive (conduction dans les argilites) pour maintenir la température au contact des colis inférieure à 100 °C.

De plus, l'état de contrainte dans les argilites induite par la chaleur doit rester dans un domaine maîtrisé scientifiquement et préservant les argilites notamment vis-à-vis du risque de fracturation. Cela conduit à retenir en référence un fonctionnement de la roche en compression⁶⁷. L'exploration de domaines plus élevés⁶⁸ offrira une voie d'opportunité qui permettrait, à l'horizon 2075, de limiter l'emprise souterraine des quartiers de stockage des déchets fortement exothermiques.

L'endommagement d'origine mécanique et thermo-mécanique induit par les ouvrages doit rester limité en intensité et extension de manière à préserver les gares d'argilites de faible perméabilité.

Le choix et les masses de matériaux introduits dans les alvéoles doivent limiter les perturbations d'origine chimique sur le verre nucléaire et sur la mobilité des substances radioactives et toxiques potentiellement relâchés (formation d'espèces complexantes, panache alcalin). Cela s'applique notamment au matériau de remplissage de l'annulaire chemisage-argilites.

Pour limiter la corrosion radiolytique du conteneur, le débit de dose au contact du colis de stockage sera aussi faible possible et en tout état de cause inférieur à 10 Gy/h.

Maintien de la sous-criticité après fermeture

La démonstration du maintien à long terme des alvéoles dans un domaine sous critique doit prendre en compte d'une part la géométrie de stockage dans l'alvéole et, d'autre part, l'évolution chimique et mécanique des matériaux et des vides résiduels.

5.2.2 Fonctions et exigences en exploitation

Stocker les colis de déchets et permettre leur retrait

L'amenée des colis jusqu'aux alvéoles puis leur positionnement horizontal à leur emplacement de stockage relèvent de systèmes de transfert des colis de stockage, dont la capacité opérationnelle doit être compatible avec les flux de livraison prévus par le PIGD. La capacité de retirer des colis stockés doit aussi être assurée sur la durée d'exploitation, en tenant compte du vieillissement. Une fois

⁶⁷ Se traduisant par des contraintes effectives négatives au sens de Terzaghi

⁶⁸ C'est-à-dire bénéficiant de la résistance en traction des argilites par exemple

l'alvéole fermé, cette capacité suppose celle de déconstruire le bouchon d'alvéole, incluant la gestion des fluides présents dans l'alvéole fermé (eau, hydrogène).

Le caractère novateur de la manutention horizontale de colis de déchets dans des micro-tunnels en fait une fonction critique.

Le conteneur de stockage doit être apte à la manutention horizontale : sa capacité à glisser dans l'alvéole participe à cette fonction critique.

Les autres fonctionnalités du conteneur en matière de manutention, non critiques compte tenu de sa robustesse mécanique, sont son aptitude à la préhension par les équipements de manutention (mise en place ; retrait en tenant compte de la durée) et la tenue à la chute (la hauteur de chute à prendre en compte résulte de la conception des installations et du process de manutention retenue dans le cadre des études d'avant-projet et de l'analyse des risques associés).

Les alvéoles et galeries d'accès doivent également être aptes au transfert des colis à l'horizontale : transfert des hottes dans les galeries d'accès, déchargement des hottes de transfert à l'entrée des alvéoles, rechargement éventuel en cas de retrait (sur la durée d'exploitation)...

Capacité à maintenir l'installation souterraine au niveau 2 puis au niveau 3 de récupérabilité, préservation des conditions du retrait des colis de stockage

La capacité à maintenir le quartier de stockage au niveau 2 de récupérabilité en situation d'alvéoles en exploitation, puis au niveau 3 avec alvéoles fermés, repose en premier lieu sur la durabilité mécanique du chemisage des alvéoles. Il s'agit d'une fonction critique.

Elle suppose en outre la gestion des fluides dans les alvéoles non encore fermés (évacuation de l'eau), la ventilation des galeries d'accès et la surveillance.

L'alvéole de stockage doit aussi être apte à être fermé lorsque le choix en est fait.

La capacité à maintenir l'installation au niveau 3 implique de prendre en compte une atmosphère ATEX à l'intérieur des alvéoles fermés.

Fonctions de sûreté en exploitation

La protection contre l'exposition au rayonnement repose sur les systèmes de transfert et la protection biologique installée en tête d'alvéole, le confinement sur la robustesse du conteneur de stockage. L'évacuation de la chaleur pendant l'exploitation mobilise la conduction dans la roche (à l'instar de la phase après fermeture du quartier) ainsi que la ventilation des galeries d'accès. La sûreté criticité est assurée par la masse de matière fissile dans les colis et leur disposition géométrique en alvéole.

5.3 Conteneur de stockage

5.3.1 Etat des lieux (TRL 5)

La conception et le dimensionnement des conteneurs de stockage sont effectués par l'Andra. Le PIGD identifie 19 familles de colis primaires HA. Les études de conception menées à ce stade ont conduit à retenir des géométries de conteneurs de stockage adaptées aux différentes géométries de colis primaires intégrant un objectif d'optimisation technico-économique (standardisation, regroupement de colis dans des conteneur bi-places,...). Le conteneur s'applique également à des colis de déchets MAVL intercalés entre des colis de déchets HA fortement exothermiques, le cas échéant.

Comme indiqué plus haut, plusieurs nuances d'acier sont étudiées en parallèle : réalisation massive en acier forgé non allié (normalisé ou trempé-revenu) à faible limite élastique (265 à 275 MPa) ; réalisation massive en acier forgé trempé revenu au Cr Mo avec forte limite élastique (500 MPa) ; sandwich comportant une virole externe en acier API5LX65. Le choix entre ces nuances est prévu pour le lancement des études d'avant-projet définitif de Cigéo, à l'issue des études et recherches en cours.

Le conteneur de stockage se trouve aujourd'hui au TRL5, c'est-à-dire que ses fonctions critiques (durabilité, robustesse mécanique, aptitude au glissement dans l'alvéole) ont été vérifiées par

simulation ou sur des maquettes représentatives des conteneurs industriels envisagés. L'aptitude du colis de stockage au glissement dans le micro-tunnel a d'ores et déjà été vérifiée par un ensemble d'essais à l'échelle 1 en environnement représentatif (projet européen ESDRED), en anticipation des essais à réaliser pour le passage aux niveaux supérieurs de l'échelle TRL.

5.3.2 Démonstration en environnement représentatif de la durabilité de l'étanchéité du conteneur (2014-2017 ; TRL 6)

Les travaux programmés d'ici 2017 viennent compléter les éléments déjà acquis et visent l'atteinte du TRL 6 à cet horizon.

Les principaux enjeux scientifiques et techniques liés à sa durabilité en situation de stockage concernent :

- la caractérisation et la comparaison des performances des nuances d'acier envisageables ;
- la vitesse de corrosion généralisée dans les conditions physico-chimiques de l'alvéole ;
- la plastification de l'acier du conteneur sur l'effet du poinçonnement par le chemisage lors de sa rupture, enclenchant notamment un risque de corrosion sous contrainte (selon la susceptibilité de l'acier à ce processus) ;
- le choix de la nuance d'acier et les spécifications des processus de fabrication, sur la base des éléments ci-dessus.

Les conditions d'environnement à prendre en compte sont :

- la température (jusqu'à 100 °C au plus, de manière transitoire), qui influence les cinétiques des processus chimiques affectant le conteneur,
- la présence d'eau (liquide/vapeur) qui enclenche les processus de corrosion,
- le chargement mécanique, hydrostatique tant que le chemisage reste intègre (§ 5.4) puis mixte (chargement hydrostatique et mécanique par le Callovo-Oxfordien) potentiellement hétérogène lorsque la rupture du chemisage entraîne un contact avec le conteneur : cette condition d'environnement renvoie à la durabilité mécanique du chemisage (§ 5.4),
- l'environnement chimique : de manière générale, l'adoption d'un matériau de remplissage à l'extrados du chemisage permettant de tamponner les perturbations chimiques⁶⁹ (cf. 4.2) conduit à mener les travaux sur la corrosion en prenant en compte un environnement argileux ou cimentaire (par exemple bas pH) de manière à couvrir le domaine possible de nature du matériau,
- le débit de dose à l'extrados du conteneur : la radiolyse de l'air humide ou de l'eau au voisinage du surconteneur est susceptible de produire des espèces oxydantes comme H₂O₂ ou des espèces chimiques acides comme HNO₃.

▪ *Etudes et choix des nuances d'acier, procédés de fabrication*

Plusieurs modèles représentatifs de conteneurs, à l'échelle 1, sont en cours de réalisation, mettant en œuvre différentes nuances candidates. Des échantillons issus de ces modèles feront l'objet d'essais de corrosion (2014-2015) : détermination de la vitesse moyenne de corrosion (généralisée) et identification de la sensibilité à la corrosion sous contrainte (CSC).

En complément, le phénomène de CSC fait l'objet d'un programme de R&D lancé en 2013 afin d'étudier le comportement des aciers des conteneurs massif ou de l'acier API5LX65 MS pour le chemisage et le conteneur bi-matériaux vis-à-vis de ce mode d'endommagement (fissuration sous contrainte), dans des eaux argileuses. En parallèle, des travaux expérimentaux visent à estimer l'impact

⁶⁹ Les observations au Laboratoire souterrain ont montré l'existence d'un transitoire acide résultant de l'oxydation des argilites au voisinage des alvéoles.

d'une passivation de l'acier sur sa sensibilité à la CSC ainsi que la cinétique de propagation d'une fissure en CSC.

Les techniques de soudage sont étudiées avec comme objectif d'obtenir une zone affectée thermiquement de qualités métallurgiques satisfaisantes, notamment vis-à-vis des phénomènes de corrosion et des contraintes résiduelles.

Des essais de soudage par faisceau d'électrons et de détensionnement⁷⁰ sont réalisés en 2015 sur les modèles de conteneur, visant à vérifier que les propriétés mécaniques de la zone soudée sont similaires à celles du métal de base. Les travaux en matière de soudage et de détensionnement sont ensuite pris en compte par les études d'APD des ateliers nucléaires de surface (2015-2017), pour l'assemblage du couvercle sur le corps⁷¹. Des échantillons de la zone soudée issue de chacun des modèles font l'objet d'essais de corrosion à l'horizon 2016 - 2017.

Le choix de la nuance d'acier⁷² est effectué début 2015 dans l'objectif d'une durée d'étanchéité la plus longue possible, en exploitant les résultats acquis à cet horizon.

▪ *Etudes et recherches sur la corrosion radiolytique*

La corrosion radiolytique est connue dans des milieux simplifiés (essais dans l'eau pure ou peu minéralisée), à température ambiante, en présence d'air et pour des débits de dose élevés (souvent bien supérieurs à 100 Gy/h). Les expérimentations réalisées jusqu'ici pour l'étude de ces processus l'ont été sur des durées courtes (quelques jours au plus) ne permettant pas d'observer les effets à long terme sur la corrosion et notamment l'atténuation dans le temps des vitesses de corrosion.

Aussi des expérimentations de corrosion sous irradiation ont été mises en place afin d'observer les modifications de la chimie des films d'eau condensés (corrosion dans l'atmosphère humide de l'alvéole) et de la chimie des eaux argileuses ainsi que leurs éventuelles conséquences sur la corrosion des aciers.

L'adoption de la voie d'opportunité consistant à diminuer l'épaisseur du conteneur pour certaines familles de déchets est conditionnée aux résultats de ces études et recherches.

▪ *Etudes et recherches sur l'évolution mécanique du conteneur*

L'évolution mécanique du conteneur sous la charge appliquée dans l'alvéole, couplée à la perte progressive d'épaisseur par corrosion, fait l'objet de simulations numériques pour déterminer la déformation progressive des conteneurs jusqu'à leur perte d'étanchéité. Celles réalisées d'ici 2015 appuient le choix de nuance d'acier. Celles réalisées en 2016-2017 contribuent à justifier la définition du conteneur (voir *infra*). Elles se fondent notamment sur les caractérisations et des essais chimio-mécaniques exploitant les modèles représentatifs de conteneurs (comportement de l'acier en plastification...).

▪ *Dossier de définition, de fabrication et de contrôle des conteneurs de stockage*

L'épaisseur de référence des conteneurs de stockage est confirmée en 2017 après vérification de l'étanchéité du surconteneur *a minima* pendant la phase thermique. Cette vérification s'appuie (i) sur les résultats des études ci-dessus menées sur la période 2016-2017 et (ii) sur une actualisation des durées de phase thermique à partir de modélisations intégrant la représentation fine de l'architecture souterraine retenue à fin d'APD (§ 5.5).

⁷⁰ Les opérations de soudage induisent souvent des contraintes internes locales proches de la limite élastique de l'acier. Le caractère circulaire de la soudure tend à accentuer le bridage de la zone soudée et donc l'augmentation des contraintes résiduelles. Les zones soudées du fond et du couvercle du conteneur de stockage seront donc soumises à un traitement de détensionnement thermique local, par induction, ayant pour objectif de limiter les contraintes résiduelles à moins de 30 % de la limite d'élasticité de l'acier. Ce détensionnement contribue ainsi à la réduction du risque de corrosion sous contrainte.

⁷¹ Le soudage du couvercle sur le corps du conteneur et le détensionnement doivent prendre en compte la limite de température de 500 °C sur le verre nucléaire, contrainte qui ne s'applique pas à la préfabrication en usine du corps.

⁷² En pratique ce choix vise à être définitif pour les déchets moyennement exothermiques stockés dans le cadre de la phase industrielle pilote, et constituera la référence pour les déchets HA stockés à plus long terme.

La période 2014-2017 s'achève par la finalisation, par l'Andra, du dossier de définition, de fabrication et de contrôle des conteneurs de stockage de déchets HA, interfacé avec la conception détaillée du procédé de manutention ressortant des études d'APD et accompagné d'un dossier justificatif.

5.3.3 Démonstration en environnement opérationnel des performances du conteneur (2018-2024 ; TRL 7)

Avant d'engager le processus industriel de fabrication de colis de stockage de déchets moyennement exothermiques, l'Andra prévoit de vérifier, en environnement opérationnel, les performances du conteneur tel que défini à l'issue de la période précédente, en tenant compte du vieillissement sur la durée d'exploitation (cf. § 5.2.2) : durabilité de l'étanchéité à l'eau en situation de stockage, aptitude au glissement en alvéole horizontale, préhension par les équipements de manutention (mise en place et retrait) ; robustesse en situation accidentelle, notamment en cas de chute. Cela permet d'atteindre le TRL 7 à l'horizon du démarrage de la phase industrielle pilote.

Comme dans la période précédente, les travaux associent des essais et des simulations. En comparaison de la période précédente :

- Les essais portent sur des modèles représentatifs de tous les aspects du dossier de définition, fabriqués par des procédés les mieux adaptés aux performances recherchées et préfigurant les procédés industriels (ces procédés viseront notamment à minimiser la présence d'impuretés, les risques de corrosion localisée, la taille des défauts internes et les risques de fragilisation par l'hydrogène). La réalisation de ces modèles nécessite d'analyser au préalable l'alternative entre l'utilisation d'installations industrielles existantes ou la réalisation d'un atelier d'essai dédié pour une partie du procédé, notamment le soudage du couvercle et du corps et le détensionnement associé⁷³.
- L'environnement opérationnel est précisé par des simulations de l'évolution des alvéoles de stockage telles que définies dans le cadre des études d'APD. Ces conditions sont appliquées aux modèles de conteneur de façon à combiner autant que possible leurs effets respectifs.

Les modèles physiques de conteneurs font l'objet :

- d'examen permettant de valider le choix des procédés de fabrication,
- d'essais de manutention (potentiellement au Laboratoire souterrain, voir *infra* § 5.4.3) et de chute⁷⁴ (en surface),
- d'essais de durabilité en environnement opérationnel.

La préparation de ces travaux implique des études préalables notamment pour :

- définir des modalités d'essais (retrait en alvéole horizontale, chute) permettant de traduire les effets du vieillissement,
- élaborer un programme d'essais de durabilité, sur maquettes complètes et/ou sur coupons, permettant de reproduire au mieux l'environnement opérationnel.

Au final les évaluations de durabilité sont mises à jour et à nouveau comparées à l'évolution des températures dans le stockage tel que défini au terme des études d'APD⁷⁵.

5.3.4 Qualification et mise en œuvre (2021-2035 ; TRL 8, TRL 9)

L'autorisation de création de Cigéo enclenche la préparation de la réalisation du génie civil de l'atelier nucléaire de surface dans lequel seront assemblés les colis de stockage de déchets HA pour la phase

⁷³ A l'instar du « Canister Laboratory » exploité par SKB dans le port d'Oskarshamn (Suède)

⁷⁴ Les conditions d'essais comporteront des marges par rapport au domaine prévu dans le cadre de l'APD de Cigéo.

⁷⁵ Le temps de retour à 50 °C des colis de déchets moyennement exothermiques est de l'ordre de 150 ans. Au vu des connaissances disponibles, le risque d'une rupture du conteneur de stockage avant ce temps de retour peut être exclu.

industrielle pilote⁷⁶, celle des équipements de cet atelier, dont les équipements d'assemblage et de contrôle des colis, et, en parallèle la mise en place du système industriel de préfabrication et de contrôle des couvercles et des corps. Cette mise en place comporte l'établissement des spécifications en exploitant l'expérience acquise par les examens et essais des modèles représentatifs élaborés lors de l'étape précédente, le choix des sites de production, l'organisation qualité et logistique...

L'ensemble des équipements de fabrication, hors site et ceux destinés à être implantés dans Cigéo, font l'objet d'essais de qualification permettant de vérifier la maîtrise des processus et de contrôler la qualité des produits.

Le démarrage de la phase industrielle pilote inactive déclenche en parallèle la mise en place du système industriel de préfabrication et de contrôle des couvercles et des corps. Cette mise en place permet de valider les spécifications d'exploitation, de confirmer l'expérience acquise par les examens et essais des modèles représentatifs, l'organisation qualité et logistique...

De nouveaux essais d'assemblage de colis de stockage sont réalisés en situation réelle (cellule chaude), en intégrant des maquettes inactives de colis primaires « AVM ». L'ensemble des paramètres du procédé sont contrôlés (par exemple la température atteinte dans le verre) et les colis produits soumis à examens (impuretés, défauts...). Des colis de stockage inactifs sont transférés dans l'installation souterraine jusqu'à leur emplacement de stockage, permettant de vérifier leur aptitude à la manutention par les moyens d'exploitation réels de Cigéo, dans des conditions d'exploitation normale et dégradées. Leur récupération et leur retour dans l'atelier nucléaire de surface sont également testés dans les mêmes conditions. Ces travaux conduisent au TRL 8 pour les colis de stockage de déchets moyennement exothermiques.

L'accueil de colis primaires HA moyennement exothermiques dans le cadre de la phase industrielle pilote, prévu par le PIGD, permet de réaliser des colis de stockage réels et de vérifier leurs performances en conditions d'exploitation de Cigéo (mise en place, récupération), d'abord dans le cadre d'essais de démarrage en actif, puis en contexte industriel (TRL 9).

Tout au long de l'exploitation, les conditions d'environnement des conteneurs sont suivies et comparées avec le domaine de fonctionnement prévu et les résultats des simulations (notamment dans le cadre d'alvéoles d'observation). La corrosion des conteneurs peut également faire l'objet de programmes d'observation spécifiques.

5.3.5 Recherche et développement sur des matériaux alternatifs de conteneur

Cette section sera complétée dans une version ultérieure.

⁷⁶ L'option de réaliser le conditionnement en colis de stockage des déchets HA moyennement exothermiques sur site producteur n'est pas retenue par le Programme industriel de gestion des déchets.

Déroulement des travaux sur le conteneur de stockage HA

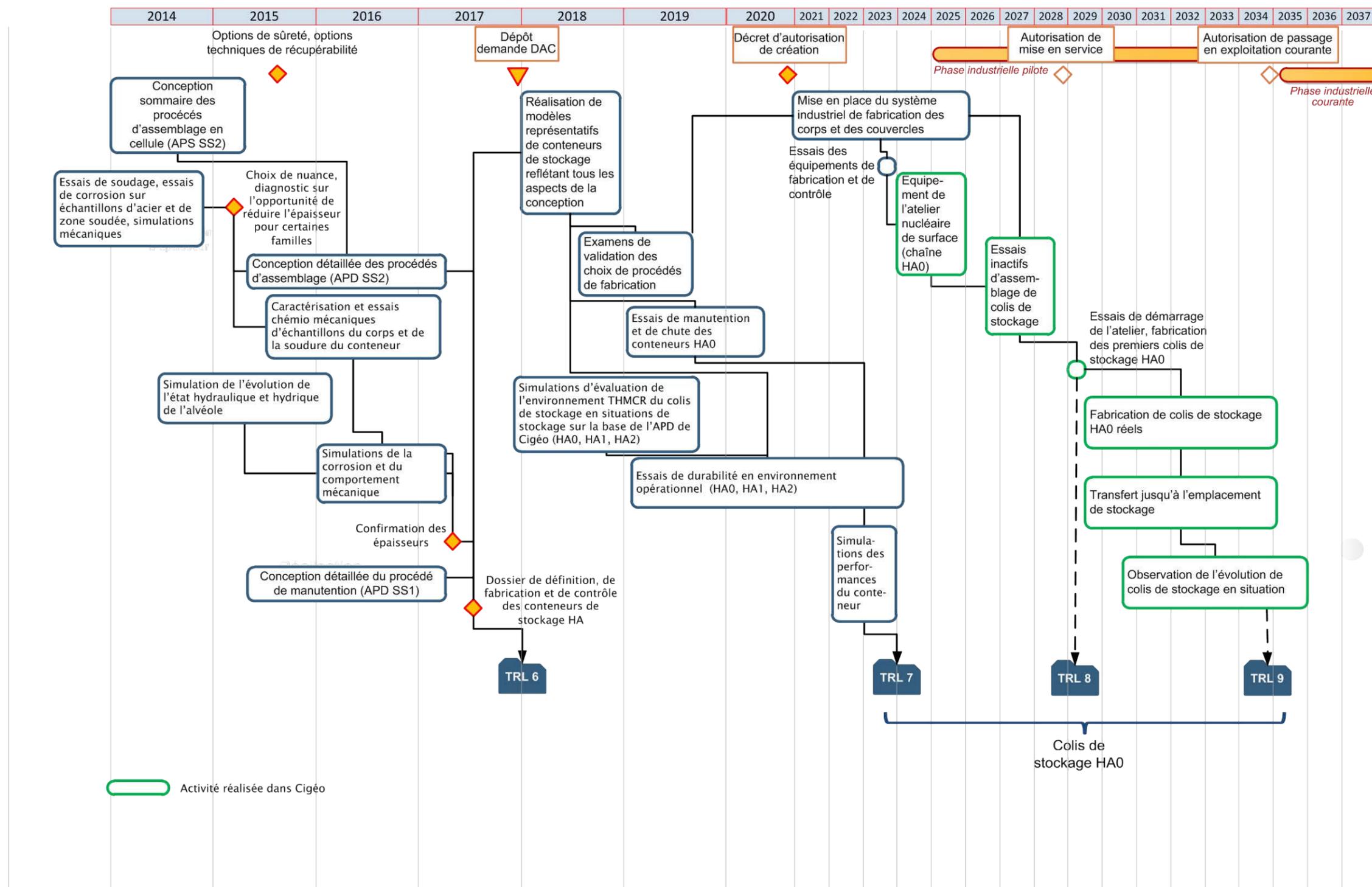


Figure 5.3-1 Logigramme des études et travaux sur les conteneurs de stockage des déchets de haute activité d'ici au passage à l'exploitation industrielle courante de Cigéo

5.4 Micro-tunnel de stockage

5.4.1 Etat des lieux (TRL 5)

La conception du chemisage et plus généralement de l'alvéole implique, comme celle du surconteneur, la prise en compte de processus mécaniques et chimiques intervenant à une échelle de temps supérieure au siècle. Aussi l'Andra impose aux maîtres d'œuvre, en données d'entrée de leurs études, certaines solutions techniques concernant le chemisage et l'alvéole HA, ceux-ci étant chargés d'en détailler ensuite la conception et d'en définir les moyens techniques de réalisation. Pour le lancement des études d'avant-projet, l'Andra a ainsi précisé les éléments de conception et de dimensionnement (cf. § 5.1) à partir (i) des essais et observations au Laboratoire souterrain et (ii) de la recherche des meilleures techniques disponibles.

Les travaux expérimentaux au Laboratoire souterrain et les simulations ont démontré la maîtrise de la dissipation de la chaleur (transfert de chaleur contrôlé par diffusion dans les argilites, pas d'influence de l'EDZ ni de processus thermo-convectifs).

Les essais technologiques au Laboratoire souterrain (expérimentation ALC) ont aussi démontré la faisabilité de creusement jusqu'à une longueur de l'ordre de 100 m incluant la mise en place de tronçons de chemisage de 20 mm d'épaisseur et 2 m de longueur emboîtés entre eux. L'extrapolation de la technique de mise en œuvre testée au Laboratoire à un chemisage plus épais ne pose raisonnablement pas de difficulté. Ces essais ont par ailleurs permis de vérifier l'obtention d'une rectitude suffisante de l'ouvrage vis-à-vis des opérations de tubage à l'avancement et de celles de mise en place et de retrait éventuel des colis. Ainsi les résultats disponibles sur le creusement des microtunnels de 80 à 100 m sont d'ores et déjà suffisants dans la perspective du TRL 6.

Les observations au Laboratoire souterrain ont souligné l'importance particulière de deux paramètres d'environnement vis-à-vis de la durabilité du chemisage : (i) le drainage de l'eau porale des argilites vers l'alvéole devrait s'accompagner d'un transitoire acide corrosif ; (ii) le chargement mécanique initial du chemisage est anisotrope et dépend des caractéristiques de l'espace annulaire argilites-chemisage.

Un essai d'injection de l'annulaire chemisage-argilites a été conduit au Laboratoire souterrain sur une longueur plus faible.

5.4.2 Evaluation en environnement représentatif de la performance mécanique du chemisage, études et recherches menées sur la période 2014-2017 (TRL 6)

Les principaux enjeux scientifiques et techniques concernant le micro-tunnel de stockage portent sur sa capacité à maintenir l'alvéole au niveau 2 puis aux niveaux 3 et 4 de récupérabilité (préservation des conditions du retrait des colis de stockage) ainsi que sur l'objectif de protection mécanique du conteneur. Pour l'atteinte du TRL 6, ils renvoient essentiellement à la durabilité mécanique du chemisage, qui dépend de leur corrosion et de leur réponse au chargement mécanique : ovalisation, comportement des jonctions. La corrosion et la réponse mécanique sont couplées : la corrosion diminue progressivement l'épaisseur résistante d'acier, la plastification de l'acier peut accroître la corrosion, selon sa susceptibilité à la CSC. Elles sont impactées par le traitement de l'espace annulaire chemisage-argilites : dimension, déformabilité et plasticité du matériau de remplissage. Pour mémoire l'exigence de performance de durabilité mécanique du chemisage des alvéoles de stockage de déchets fortement exothermiques (réalisés à l'horizon de 2075) est plus élevée que celle des alvéoles de déchets moyennement exothermiques envisagés dès la phase industrielle pilote.

Les conditions d'environnement à prendre en compte sont :

- la température : la température a des effets mécaniques (dilatation du chemisage, particulièrement dans la direction longitudinale de l'alvéole ; augmentation des déformations appliquées par les argilites) et impacte les conditions hydriques (pressions partielles) et chimiques (cinétiques réactionnelles) ;
- le chargement mécanique et thermo-mécanique du chemisage : les essais réalisés au Laboratoire souterrain ont montré que la mise en charge mécanique du chemisage par la roche

intervient d'abord de manière localisée, préférentiellement dans la direction horizontale avec ou sans pression de fluide appliquée sur les zones libres de contact en extradors et en intradors. Le chemisage, sollicité en flexion radiale, peut alors entrer en plasticité après quelques années, aussi bien sous un état de contrainte de traction que sous un état de contrainte de compression. Les déformations plastiques restent localisées et faibles ce qui n'affecte pas la tenue mécanique du chemisage mais pose la question de la CSC.

- la percolation radiale d'eau provenant des argilites ;
- la possibilité de transferts de fluides longitudinaux jusqu'à ou depuis la galerie d'accès, à l'intérieur de l'alvéole, dans l'annulaire chemisage-argilites s'il n'est pas rempli et dans la zone fracturée connectée (gaz en phase d'exploitation⁷⁷, gaz+eau liquide après fermeture de l'alvéole).
- Les conditions chimiques : à l'instar du conteneur les conditions chimiques à considérer sont argileuses ou cimentaires. En phase d'exploitation, la pénétration d'oxygène en provenance de la galerie d'accès peut concerner une part plus ou moins importante de l'alvéole (particulièrement en tête d'alvéole).
- le débit de dose, à l'instar du conteneur.

Par ailleurs, dans un objectif d'optimisation technico-économique, l'industrialisation des micro-tunnels passe par la recherche d'une réduction des durées unitaires de réalisation.

▪ **Etudes de conception**

Partant des exigences fournies par l'Andra, les études de conception confiées aux maîtrises d'œuvre fournissent en 2015 puis 2017 une conception sommaire puis détaillée des alvéoles de stockage (phases APS et APD). Il s'agit par exemple de préciser la configuration des têtes d'alvéoles en lien avec les procédés d'exploitation (besoin et définition du bouchon de radioprotection⁷⁸, modalités d'accostage de la hotte de transfert de colis, etc.)

▪ **Etudes et recherches sur la corrosion**

Les études et recherches sur la corrosion mentionnées plus haut pour le conteneur répondent aussi aux besoins d'évaluation de durabilité du chemisage. En particulier le programme de R&D sur la CSC (fissuration sous contrainte) vise à pouvoir statuer en 2015 sur la susceptibilité de l'acier API5LX65 MS à la CSC ; si les tests mettent en évidence une telle susceptibilité, le comportement mécanique du chemisage devra prendre en compte la présence de réseaux de microfissures.

En plus de la CSC, l'évaluation globale de la corrosion du chemisage se fonde d'ici 2017 sur :

- l'étude *in situ* du transitoire acide et la poursuite d'essais de corrosion en environnement représentatif (coupons) prenant en compte la présence d'un matériau tampon pH remplissant l'annulaire argilites-chemisage ;
- des simulations de l'évolution de l'état hydraulique et hydrique de l'alvéole. Les observations au Laboratoire souterrain seront utilisées en support : pénétration de l'oxygène, production d'eau liquide et vapeur, formation éventuelle d'hydrogène.

▪ **Etudes et recherches sur le comportement mécanique du chemisage et le risque de flambement**

Afin de bien rendre compte du comportement mécanique du chemisage dans le temps, son évaluation a été découplée de celle de la charge appliquée par les argilites, ce qui a pour effet de sévérer le chargement appliqué. De manière à être plus représentatif de l'interaction sol/structure, des essais de flambement sur modèles de chemisage sous sollicitations de type solide/solide sont réalisés sur la période 2015-2016 en laboratoire de surface. Un banc d'essai est spécialement développé pour

⁷⁷ En situation d'exploitation, l'eau liquide est évacuée gravitairement hors de l'alvéole.

⁷⁸ Conformément à l'engagement pris par l'Andra en 2014 lors de l'instruction relative au dossier « ouvrages de fermeture » de justifier « la pertinence de la conception du bouchon de radioprotection au regard de la sûreté en phase d'exploitation (mise en place et dépose en cas de retrait des colis de déchets HA) et au regard de son impact potentiel sur la sûreté en phase post-fermeture (interaction mécanique avec les colis de déchets HA) »

permettre d'acquérir des connaissances sur les modes de flambement attendus du chemisage, son comportement post-flambement et les temps caractéristiques associés. Les mécanismes mis en jeu font l'objet de modélisations sur la base des travaux réalisés sur les pipelines enterrés.

Pour mieux comprendre le rôle de la rigidité de la roche dans le chargement transmis au chemisage, plusieurs actions sont prévues sur la période 2014-2016 : mise en place d'un essai in-situ sur tubage à échelle réduite, mesure de la compressibilité de la roche en périphérie d'un alvéole HA échelle 1 (2015), actions de modélisation de l'interaction roche/chemisage (2014-2015). Ces actions visent à évaluer l'influence des caractéristiques de l'annulaire argilites-chemisage.

L'ensemble de ces travaux sont exploités pour mettre à jour en 2016-2017 les simulations d'évolution mécanique du chemisage en tenant compte de la corrosion ainsi que des dilatations thermiques.

▪ **Etudes et recherches sur le remplissage de l'annulaire chemisage-argilites**

En plus du rôle de tampon pH, le choix du matériau d'injection de l'espace annulaire chemisage-argilites vise aussi à ce que les éventuelles perturbations chimiques qu'il pourrait induire sur le verre nucléaire et sur la mobilité des radionucléides relâchés (introduction de phases solides cimentaires, perturbation alcaline, espèces complexantes) soient aussi limitées que possible. Partant de l'identification de formulations candidates en fin d'APS (2015) et des essais de corrosion en environnement représentatif mentionnés *supra*, la formulation *ad hoc* du matériau de remplissage est retenue en 2017.

Le choix de formulation peut aussi bénéficier d'essais de mise au point de procédé de construction (optimisation des joints des liaisons entre tronçons, mise en place de la plaque de fond...) poursuivis au Laboratoire souterrain dans la perspective de l'étape suivante du développement des alvéoles HA (voir *infra*, § 5.4.3).

▪ **Etudes de criticité**

La vérification du maintien du caractère sous-critique de l'alvéole à long terme implique (i) de décrire les possibilités de déplacement et de les risques de concentration de matière fissile, après perte d'étanchéité du conteneur et altération du verre nucléaire puis (ii) de vérifier par le calcul le respect des critères fixés [5].

5.4.3 Démonstration en environnement opérationnel (2017-2024, TRL 7)

A l'instar du conteneur de stockage, l'Andra prévoit de vérifier, en environnement opérationnel, la capacité à réaliser et les performances de l'alvéole de stockage de déchets HA moyennement exothermiques de façon à atteindre le TRL 7 avant la construction des alvéoles HA de la phase industrielle pilote.

Cette vérification s'effectue en grande partie au Laboratoire souterrain en réalisant, testant et observant des modèles d'alvéoles représentatifs de l'ensemble des aspects de la conception ressortant des études d'APD (partie courante, tête de micro-tunnel, plaque de fond). La construction de ces modèles *in situ* est effectuée en 2017.

Les essais au Laboratoire souterrain sont complétés par :

- des essais de comportement des matériaux en surface, qui s'attachent aux conditions d'environnement difficiles à simuler *in situ* de par leur nature ou de par les temps caractéristiques des processus (effet du débit de dose sur la corrosion par exemple, à l'instar du conteneur) ;
- de simulations sur modèle numérique permettant d'extrapoler sur la durée les observations effectuées sur quelques années.

Les fonctions critiques déjà traitées à l'étape précédente sont éprouvées sur les nouveaux modèles : durabilité chimique et mécanique du chemisage, efficacité et durabilité de l'effet tampon du matériau de remplissage éventuel, impact des phases solides cimentaires sur le verre nucléaire... Vis-à-vis de la

durabilité du chemisage, l'utilisation de capteurs innovants de type "tapis sensitifs" permettra de mieux cartographier l'évolution de la contrainte appliquée à l'extrados du chemisage.

En outre les travaux menant au TRL 7 couvrent les autres fonctionnalités attendues des micro-tunnels :

- transfert et mise en place des colis de déchets en conditions initiales,
- retrait des colis de déchets en tenant compte de l'évolution des conditions physico-chimiques en alvéole (température notamment, cf. § 5.6),
- protection biologique en tête de micro-tunnel,
- capacité à évacuer l'eau liquide (pente de l'alvéole légèrement montante, purge en tête d'alvéole) et à gérer l'hydrogène susceptible de se former par corrosion dans les parties anoxiques,
- capacité à fermer l'alvéole.

L'aptitude des alvéoles à la manutention des colis peut être vérifiée *in situ* en conditions opérationnelles au moyen de bancs d'essais simplifiés ou éventuellement de modèles représentatifs des équipements d'exploitation (§ 5.6).

La formation éventuelle d'hydrogène et la composition de l'atmosphère en fond d'alvéole au cours de la période d'exploitation sont caractérisées par des mesures au Laboratoire souterrain et par la modélisation.

La préparation de ces travaux implique des études préalables à partir de 2015. Il s'agit de définir le plan d'essais *in situ* et en surface permettant de rendre compte notamment de la dilatation thermique longitudinale (en tenant compte du frottement réalisé par le matériau de remplissage et du chargement radial), de l'évolution du chargement mécanique du chemisage et des autres conditions d'environnement (température, percolation d'eau porale des argilites et caractéristiques chimiques associées, pénétration d'oxygène, irradiation...).

5.4.4 Qualification et mise en œuvre industrielle (2025-..., TRL 8, TRL 9)

La préparation des approvisionnements des éléments préfabriqués nécessaires à la réalisation des micro-tunnels de stockage de Cigéo démarre avec l'autorisation de création du Centre (tronçons de chemisage, interfaces d'accostage...). Si nécessaire des essais de qualification sont réalisés sur des prototypes (cas de productions hors référentiel normatif). Pour cela les protocoles et bancs d'essais utilisés en surface aux étapes précédentes sont exploités (voir notamment le § 5.4.2 sur le comportement mécanique du chemisage).

La construction des premiers alvéoles suivie de contrôles puis d'essais inactifs de mise en place et de retrait de colis en conditions réelles permet d'atteindre le TRL 8. La construction est précédée de mesures des principales caractéristiques des argilites à l'emplacement du quartier de stockage, particulièrement sa conductivité thermique, afin de vérifier l'adéquation du dimensionnement aux caractéristiques locales.

Le chargement des premiers micro-tunnels de stockage avec des déchets HA moyennement exothermiques des conditions industrielles représentatives est envisagé à l'horizon 2029, sous réserve de l'autorisation de mise en service. A l'instar des autres composantes industrielles de Cigéo, ce chargement s'effectue d'abord dans le cadre d'essais de démarrage en actif, puis en contexte industriel.

Une démonstration de la récupérabilité de colis de déchets est effectuée dans le cadre des essais de démarrage, puis renouvelée au cours de la phase industrielle pilote avec la montée en température des alvéoles (voir *infra*).

En plus de la surveillance des paramètres clés reliés aux fonctions de sûreté et à la récupérabilité, tels que la température maximale dans les argilites ou les contraintes et déformations dans le chemisage, l'observation de micro-tunnels équipés spécifiquement à cet effet permet de suivre en détail l'évolution

des conditions d'environnement en situation réelle (cf. § 5.4.2). Cela comprend notamment l'augmentation de température dans les alvéoles et en paroi d'argilites et la dilatation consécutive du chemisage, a minima jusqu'au pic.

Deux micro-tunnels d'observation n'ont pas vocation à être pérennisés en raison d'une part de la potentielle perturbation de leurs composants et du milieu par le système d'auscultation et d'autre part de la possibilité d'y réaliser des analyses destructives après retrait des colis. Un de ces ouvrages est maintenu en position d'exploitation (niveau 2 de récupérabilité) jusqu'au retrait des colis, alors que l'autre sera obturé en cours d'observation, permettant de démontrer en conditions réelles l'aptitude de l'alvéole à être fermé [5].

Pendant la phase industrielle pilote, des essais de mise au point et de qualification de micro-tunnels de longueur augmentée (150 m) sont réalisés dans l'optique de consolider cette voie d'opportunité pour les déchets fortement exothermiques prévus d'être reçus au-delà de 2075. Ces résultats s'ajoutent au retour d'expérience du chargement des microtunnels avec des déchets moyennement exothermiques pour optimiser la conception et nourrir la démonstration de performance des futurs microtunnels de stockage de déchets fortement exothermiques.

Déroulement des travaux sur l'alvéole de stockage HA

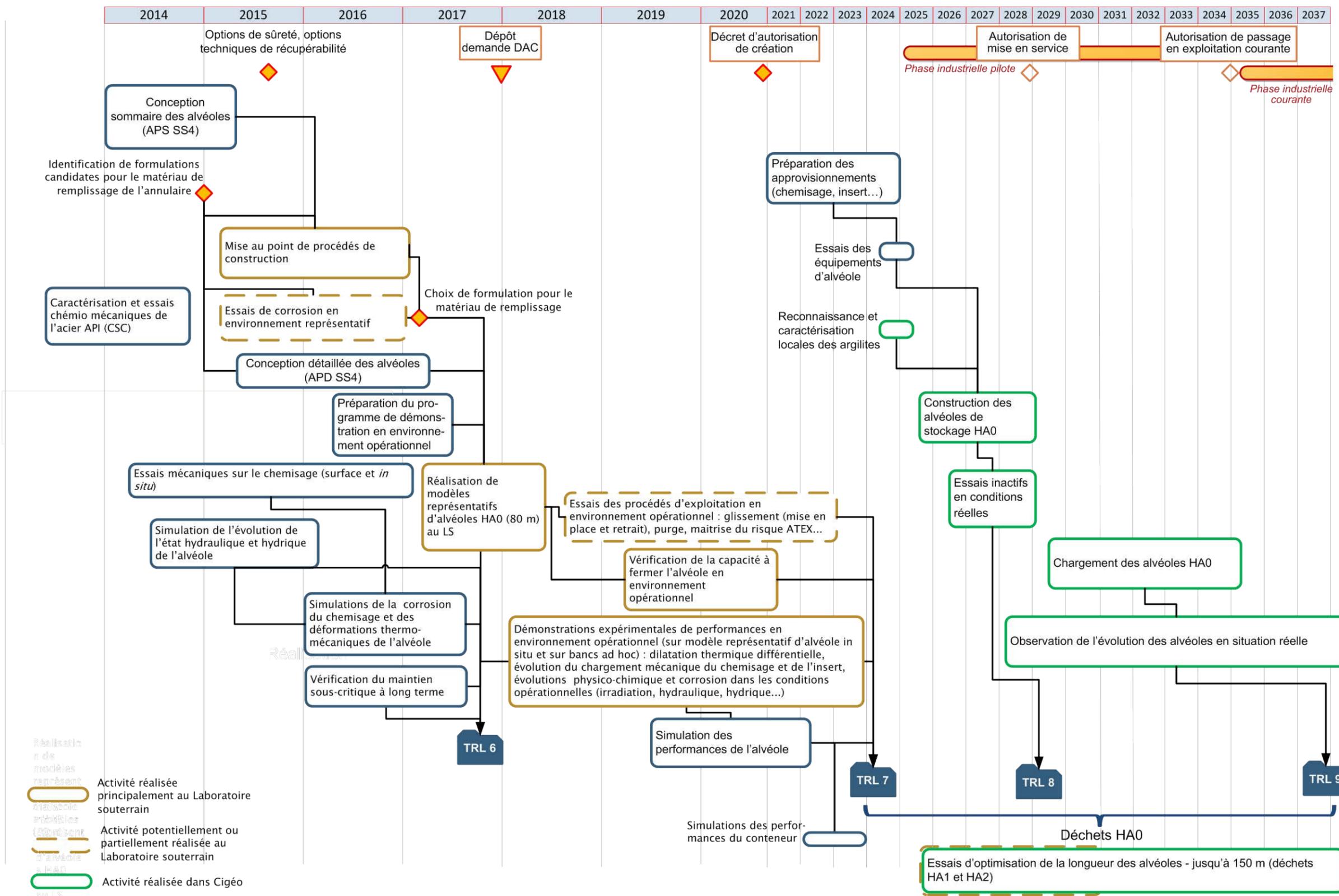


Figure 5.4-1 Logigramme des études et travaux sur les micro-tunnels de stockage des déchets de haute activité d'ici au passage à l'exploitation industrielle courante de Cigéo

5.5 Quartier de stockage

5.5.1 Etat des lieux (TRL 5)

Au stade de l'esquisse industrielle de Cigéo, les micro-tunnels de stockage de déchets HA moyennement exothermiques stockés dans le cadre de la phase industrielle pilote (et potentiellement jusqu'à l'horizon 2075) forment un quartier dédié (quartier HA0). Au-delà de 2075, les déchets HA sont accueillis dans de nouveaux quartiers de stockage construits et exploités successivement.

Les quartiers de stockage HA sont dimensionnés essentiellement par la thermicité des déchets. Les études et recherches ont montré en particulier l'impact d'une densification du chargement des colis dans les alvéoles et des alvéoles au sein des quartiers sur la perturbation hydro-mécanique à grande échelle des argilites : dilatation thermique des couches géologiques, apparition de contraintes thermomécaniques et de surpressions de pore dans les argilites du Callovo-Oxfordien.

Les critères de dimensionnement de Cigéo sont établis de manière prudente (§ 4.1). Ces critères visent à établir un domaine de fonctionnement (i) couvert par l'état des connaissances et compatible avec la capacité à rendre compte des phénomènes et de leurs couplages et (ii) permettant de garantir la préservation des propriétés favorable du Callovo-Oxfordien.

Concernant les galeries d'accès aux alvéoles, le creusement de galeries à la MAP dans la direction normale à la contrainte horizontale majeure a été testé au Laboratoire souterrain.

5.5.2 Conception des quartiers HA, évaluation de leur fonctionnement thermo-hydro-mécanique (TRL 6)

Les principaux enjeux scientifiques et techniques à l'échelle des quartiers de stockage HA concernent les fonctions critiques suivantes :

- limitation du relâchement des radionucléides et immobilisation dans le stockage : le dimensionnement thermique du quartier impacte l'évolution dans le temps de la température dans les alvéoles ; la durée des phases thermiques qui en résulte (*i.e.* durées d'atteinte des contraintes de température du verre) doit être mise en regard de la durabilité des conteneurs ressortant des études et recherches décrites à la section 5.3 ;
- retard et atténuation de la migration : (i) définition du niveau précis d'implantation de chaque quartier HA, qui détermine l'épaisseur de garde d'argilites ; (ii) maîtrise des perturbations hydro-mécaniques de cette garde d'argilites induites par l'élévation de température et (iii) la zone fracturée connectée autour de la galerie d'accès : fracturation initiale et l'effet de la perte d'intégrité à terme des revêtements renvoie aux actions déjà mentionnées plus haut pour les galeries d'accès aux alvéoles MAVL ; la spécificité des quartiers HA réside dans la superposition d'une charge thermique ;
- transfert des colis de stockage jusqu'à leur emplacement de stockage, capacité à retirer des colis de stockage et à les transférer vers d'autres alvéoles de stockage ou en surface : définition du soutènement et revêtement des galeries d'accès réalisées à la MAP (phase industrielle pilote) ou au tunnelier (déchets fortement exothermiques) ; stabilité dimensionnelle et déformations sur la durée d'exploitation.

De même que pour la zone fracturée connectée, une spécificité de la définition des revêtements et de la stabilité séculaire des galeries d'accès aux alvéoles HA provient de la chaleur dégagée par les déchets. Celle-ci entraîne par effet de bord des contraintes thermomécaniques dans les bétons structurels, notamment des tractions en partie « froide ». De plus, une modification des conditions d'ambiance (température de l'air de ventilation) résultant de variations éventuelles de régime de ventilation (reprise de ventilation d'exploitation après une période prolongée de ventilation réduite) génère des contraintes thermomécaniques sur le revêtement.

Les principales conditions d'environnement sont :

- la charge thermique induite par les différents types de déchets HA et la diffusion de la chaleur dans les argilites,
- la contrainte horizontale majeure normale à l'axe des galeries d'accès (comme dans le cas du quartier MAVL),
- la réponse hydro-mécanique des argilites à l'élévation de la température (variations des pressions interstitielle et de la contrainte effective en regard de la résistance mécanique) et la réponse mécanique des argilites au creusement des galeries d'accès (déformations, ruptures, comportement de la zone endommagée),
- la ventilation des galeries pendant la période d'exploitation et les variations éventuelles de débit au cours des phases successives de travaux et d'attente,
- l'aléa sismique (à l'instar du quartier MAVL, § 4.5).

Certaines de ces conditions d'environnement et plus généralement les fonctions critiques dépendent des caractéristiques locales des argilites (par exemple la conductivité thermique et les paramètres poromécaniques, voir aussi la section 5.4). A l'instar du quartier MAVL, cela amène à prévoir un processus de reconnaissance et caractérisation « à l'avancement » lors de la réalisation de tout nouveau quartier HA.

▪ **Conception des quartiers HA**

En cohérence avec les déchets MAVL, le niveau précis d'implantation de chaque quartier de stockage HA est défini au plus tard pour l'enclenchement des études d'APD sur la base d'études de sensibilité des performances en matière de retard et d'atténuation de la migration.

La conception sommaire puis détaillée du quartier de stockage des déchets moyennement exothermiques HA0 prend en compte les critères de dimensionnement thermique mentionnés plus haut, le calendrier de livraison du PIGD ainsi que les évaluations de durabilité du conteneur de stockage. Elle détermine aussi si le quartier sera construit en tout ou partie avant la mise en service de Cigéo, en analysant les enjeux technico-économiques d'une possibilité de co-activité entre la réalisation d'alvéoles et l'exploitation nucléaire.

La conception sommaire des quartiers de stockage des déchets fortement exothermiques prend en compte le comportement THM des argilites sur la base des critères de dimensionnement thermique spécifiés et des différentes puissances thermiques des déchets liées à leur calendrier de livraison. Elle vise notamment à une optimisation technico-économique du linéaire de galeries (retournement des tunneliers...). Si le caractère « définitif » de la conception issue des études d'APD ne peut s'appliquer aux déchets fortement exothermiques, livrés au-delà de 2075, les études d'APD comprennent une tenue à jour de la conception des quartiers correspondants.

La conception des quartiers intègre les dispositions de reconnaissance à l'avancement.

▪ **Etudes et recherches sur le comportement thermo-hydro-mécanique des quartiers de stockage HA**

L'atteinte du TRL 6 pour les quartiers HA implique des vérifications expérimentales au Laboratoire souterrain en conditions représentatives sur :

- l'évolution des pressions interstitielles et contraintes effectives dans les argilites en présence d'un champ de températures et les mécanismes de rupture induits ;
- les effets thermomécaniques induits par la chaleur des déchets (et par les cycles éventuels de ventilation) sur les revêtements de galeries d'accès, ainsi que la prise en compte des effets thermomécaniques sur l'EDZ (en complément des études et recherches sur les galeries d'accès sans charge thermique mentionnées plus haut pour le quartier MAVL).

Les résultats expérimentaux sont utilisés pour caler et valider les simulations numériques du comportement THM du quartier conçu dans le cadre des études d'avant-projet.

La charge thermique du quartier de déchets moyennement exothermiques réalisé dans le cadre de la phase industrielle pilote est plus faible que celle des futurs quartiers de stockage de déchets fortement exothermiques. Les résultats obtenus en 2015 permettent a minima de démontrer les fonctions critiques du quartier de stockage des déchets moyennement exothermiques (HA0) en conditions représentatives (TRL 6). Si nécessaire, les travaux sont poursuivis entre 2015 et 2020 pour couvrir au final les conditions thermiques des quartiers de stockage des déchets fortement exothermiques.

Partant de l'APD, les simulations thermiques ont aussi pour objectif d'actualiser en 2017 l'évaluation de la durée de la phase thermique en regard de celle du conteneur.

5.5.3 Démonstration sur modèles représentatifs (2017-2024, TRL 7)

Pour permettre au quartier de stockage d'atteindre le TRL 7 avant la phase industrielle pilote de Cigéo, *a minima* pour les déchets moyennement exothermiques, les fonctions mentionnées plus haut doivent être démontrées sur des modèles représentatifs des résultats de la conception (APD).

- **Démonstration du comportement thermo-hydro-mécanique des argilites**

En complément à la simulation numérique, il est envisagé d'étudier la faisabilité puis de mettre en œuvre au Laboratoire souterrain un modèle thermique expérimental de quartier *in situ*, à échelle réduite, pour démontrer la maîtrise des perturbations THM des argilites. Dans un premier temps (à partir de 2018), le modèle s'attache à représenter le quartier de stockage de déchets moyennement exothermiques ; les travaux correspondants visent à démontrer le respect des critères retenus et à en vérifier le conservatisme.

En support, les travaux de R&D sur les modélisations T, TH et THM et THGaz représentatives sont menés en lien étroit avec l'acquisition de données, afin de disposer d'une représentation « intégrée » des phénomènes. Elles visent à rendre compte, de manière plus fine, des transferts de masse et de chaleur et de leur répercussions sur les phénomènes couplés.

- **Démonstration du comportement thermomécanique des galeries d'accès**

De même, il est envisagé d'étudier la mise en œuvre au Laboratoire souterrain d'un modèle de galerie d'accès aux alvéoles (dans un premier temps HA0) pour vérifier le chargement thermomécanique et la tenue de l'ouvrage dans les conditions d'environnement décrites *supra*. Des simulations permettent de transposer l'échelle temps-espace de l'essai à l'ouvrage futur.

L'intégration d'objectifs de démonstration concernant la zone fracturée à l'excavation dépendra des résultats de l'étape précédente sur la prise en compte des effets thermomécaniques.

- **Etudes des marges de dimensionnement en vue de l'optimisation des quartiers de stockage de déchets fortement exothermiques**

Pour les déchets fortement exothermiques, la mise en œuvre de modèles *in situ* a comme premier objectif d'évaluer les marges sur les critères de dimensionnement THM. L'optimisation technique et économique des volumes et de l'emprise des quartiers de stockage de ces déchets dépend en effet des critères retenus *in fine*. Sachant que la représentativité des essais augmente avec leur échelle temps-espace, il est envisageable de leur consacrer toute la période 2020-2030 au Laboratoire souterrain (en partant des travaux menés dans un premier temps pour les déchets moyennement exothermiques).

5.5.4 Mise en œuvre du quartier HA0 de Cigéo (2025-..., TRL 8, TRL 9)

Dans Cigéo, la construction des galeries d'accès aux alvéoles de stockage de déchets moyennement exothermiques s'accompagne de la caractérisation de la zone fracturée initialement. Celle des micro-tunnels (§ 5.4.4) est suivie d'essais inactifs de transfert de colis de déchets jusqu'aux et depuis les alvéoles (TRL 8).

Le chargement des alvéoles avec des colis de déchets moyennement exothermiques dans le cadre de la phase industrielle pilote enclenche une montée progressive en température, dont on observe les effets sur les contraintes dans les argilites d'une part et sur les contraintes et déformations dans les

revêtements des galeries d'accès d'autre part. De même l'évolution éventuelle de la zone fracturée connectée autour des galeries d'accès est observée.

L'observation de longue durée apporte un retour d'expérience pour les déchets fortement exothermiques. Cependant les critères de dimensionnement pour les déchets fortement exothermiques pouvant être moins conservatifs que ceux retenus pour la phase industrielle pilote, il est envisagé de compléter celle-ci dans Cigéo par de nouveaux essais sur modèles thermiques inactifs, visant à vérifier expérimentalement les performances THM des futurs quartiers de stockage de déchets fortement exothermiques, ici encore en privilégiant une échelle temps-espace aussi représentative que possible.

Déroulement des travaux sur le quartier de stockage HA

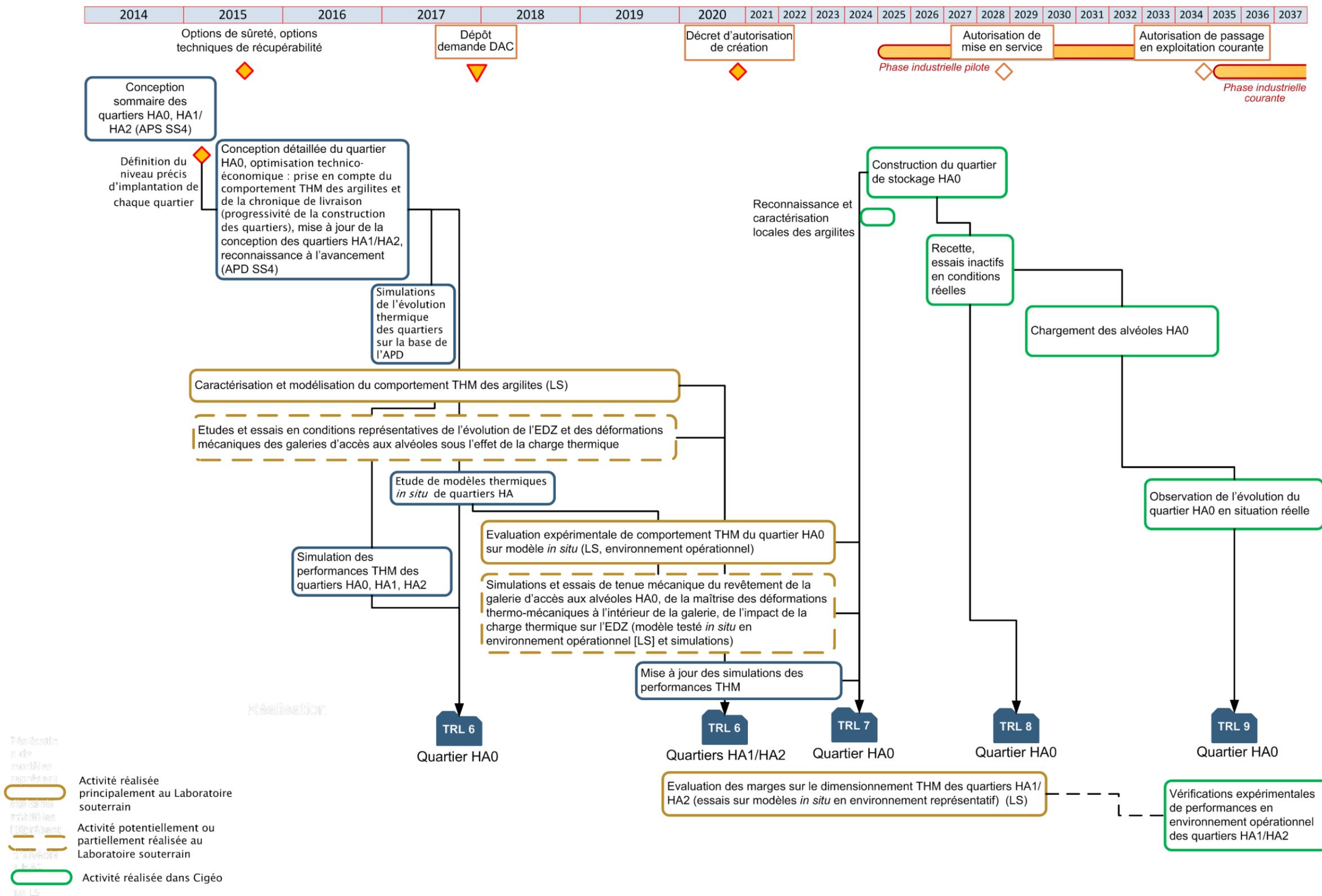


Figure 5.5-1 Logigramme des études et travaux sur les quartiers de stockage des déchets de haute activité d'ici au passage à l'exploitation industrielle courante de Cigéo

5.6 Moyens d'exploitation

5.6.1 Moyens de mise en place et retrait des colis de stockage

Comme dans le cas des déchets MAVL, les maîtrises d'œuvre sont chargées de définir les moyens de mise en place et de retrait à utiliser dans les quartiers HA (au stade de l'APS en 2015 puis de l'APD en 2017).

Etat des lieux

Corollairement à l'aptitude au glissement des colis de stockage, la capacité à pousser et à tirer un colis horizontalement en micro-tunnel a d'ores et déjà été vérifiée par un ensemble d'essais à l'échelle 1 en environnement représentatif des conditions mécaniques de travail (TRL 5).

2014-2017 (Exploitation au niveau 2 : TRL 6)

Des essais de retrait sur un nouveau modèle de robot-pousseur sont en cours de développement avec prise en compte des contraintes d'environnement représentatives de la période d'exploitation : enrouillement et échauffement. Ils sont prévus d'être réalisés sur une portion de chemisage en surface.

Parallèlement à ces essais, les études d'APS et d'APD aboutissent en 2017 à la conception d'un dispositif complet intégrant l'accostage sur la tête d'alvéole et la radioprotection.

2017-2025 (Exploitation au niveau 2 : TRL 7 / récupération au niveau 3 : TRL6)

Le système de mise en place et retrait défini à l'issue des études d'APD fait l'objet d'essais en environnement opérationnel à partir de 2018. Une partie de ces essais est envisageable au Laboratoire souterrain en exploitant les modèles d'alvéoles représentatifs qui y sont construits en 2017. Le choix de réaliser ou non une partie de ces essais *in situ* s'effectue d'ici 2016.

Dans l'hypothèse où les études d'avant-projet maintiennent, en plus du système de mise en place et retrait de référence, le principe d'équipements spécifiques pour les scénarios hypothétiques de retrait d'un grand nombre de colis, seuls les éléments technologiques de ces équipements assurant des fonctions critiques sont testés.

Les essais mis en place pour l'atteinte du TRL 7 à l'horizon de 2024 reproduisent les conditions opérationnelles suivantes :

- évolution des conditions d'environnement dans l'alvéole sur la durée d'exploitation (enrouillement, ruissellement d'eau, formation éventuelle d'hydrogène dans le corps d'alvéole par corrosion, déformations thermomécaniques du chemisage et de la tête d'alvéole... cf. § 5.4) ;
- déformations thermomécaniques éventuelles de la galerie d'accès sur la durée d'exploitation (§ 5.5).

Après fermeture des alvéoles, un retrait de colis de déchets implique de mettre en œuvre des procédés complémentaires pour la déconstruction du bouchon d'alvéole et la remise de l'alvéole en configuration d'exploitation, incluant notamment la gestion des fluides présents - hydrogène, eau chaude ou vapeur - (niveau 3 de récupérabilité [6]).

Les essais en conditions représentatives de ces procédés peuvent se dérouler au terme des essais mentionnés ci-dessus et en lien avec les travaux sur la vérification de la capacité à fermer les alvéoles (§ 5.4). Cela permet d'atteindre le TRL 6 pour la récupération de colis au niveau 3 avant le démarrage de la phase industrielle pilote de Cigéo.

2025-2035 (Exploitation au niveau 2 : TRL 9 / récupération au niveau 3 : TRL7)

Les équipements de Cigéo pour la mise en place et le retrait⁷⁹ au niveau 2 font l'objet d'essais en inactif, d'abord dans les locaux des fournisseurs, puis en conditions réelles dans Cigéo (TRL 8).

L'exploitation industrielle pilote de Cigéo comprend la mise en stockage de colis de déchets HA moyennement exothermiques ainsi que des démonstrations de retrait d'un colis réel (au niveau 2 de récupérabilité), menées périodiquement au fur et à mesure de la montée en température des alvéoles, jusqu'à l'atteinte du maximum thermique (TRL 9). La première démonstration de retrait s'inscrit dans le cadre des essais de démarrage en actif de l'installation.

En parallèle, la phase industrielle pilote de Cigéo comprend des essais inactifs en conditions opérationnelles des procédés complémentaires de déconstruction du bouchon et de remise en configuration de l'alvéole, permettant d'amener ces procédés au TRL 7. Cela permet d'envisager des décisions de fermeture de premiers alvéoles HA au terme de la phase industrielle pilote en ayant au préalable démontré en conditions opérationnelles la récupération de colis de déchets après cette fermeture.

5.6.2 Moyens de surveillance

A l'instar des déchets MAVL, les maîtrises d'œuvre déterminent le programme de surveillance des quartiers de stockage HA pour la sûreté des opérations d'exploitation qui s'y déroulent, et l'Andra les besoins associés à la récupérabilité des colis de déchets et à la sûreté après-fermeture. Les maîtrises d'œuvre définissent sur ces bases l'ensemble des moyens de surveillance à installer dans un quartier HA (au stade de l'APS en 2015 puis de l'APD en 2017). Le déroulement des travaux sur l'instrumentation est identique aux déchets MAVL (§ 4.6.2).

5.6.3 Moyens de gestion des fluides dans les alvéoles, ventilation des galeries d'accès

La gestion des fluides dans les alvéoles non encore fermés, notamment l'évacuation de l'eau liquide (cf. § 5.4), suit le déroulement suivant :

- Définition des moyens techniques dans le cadre des études d'APS et d'APD (2015-2017) ;
- Démonstration *in situ* à partir de 2017 sur modèle d'alvéole représentatif (§ 5.4) ;
- Essais inactifs, puis en actif, dans le cadre de la phase industrielle pilote, suivi sur plusieurs années et retour d'expérience.

Ce paragraphe sera complété dans une version ultérieure pour couvrir la ventilation des galeries d'accès et la gestion de l'atmosphère ATEX d'un alvéole fermé (maintien au niveau 3 de récupérabilité).

5.6.4 Moyens de protection contre l'exposition au rayonnement

Comme pour les déchets MAVL, les moyens de protection contre l'exposition au rayonnement mis en œuvre dans Cigéo sont similaires à ceux utilisés dans l'industrie et ne posent pas de question quant à leur maturité technologique. Leur conception et leur dimensionnement s'effectuent dans le cadre des études d'APS et d'APD en intégrant l'étude comparative de plusieurs possibilités de zonage radiologique du quartier et une optimisation de la radioprotection [5]. Ce travail couvre les hottes de transfert des colis, les dispositifs d'accostage sur l'alvéole ainsi que le « bouchon de protection biologique » placé à l'intérieur de l'alvéole dont les principes de conception (position, mise en place, etc.) demandent à être précisés. Ce dernier est ensuite testé *in situ* en conditions opérationnelles sur modèle représentatif d'alvéole réalisé en 2017.

Dans le cadre des essais inactifs de la phase industrielle pilote, les performances de l'ensemble des protections sont vérifiées au moyen de sources radioactives scellées, avant mise en service de Cigéo.

⁷⁹ Ces équipements ne comprennent pas de dispositifs spécifiques de retrait pour des scénarios hypothétiques d'un grand nombre de colis de déchets. De tels dispositifs ne seraient réalisés puis testés, d'abord en inactif, puis en actif, que dans le cas où une telle opération serait décidée.

Déroulement des travaux sur l'exploitation du quartier de stockage HA

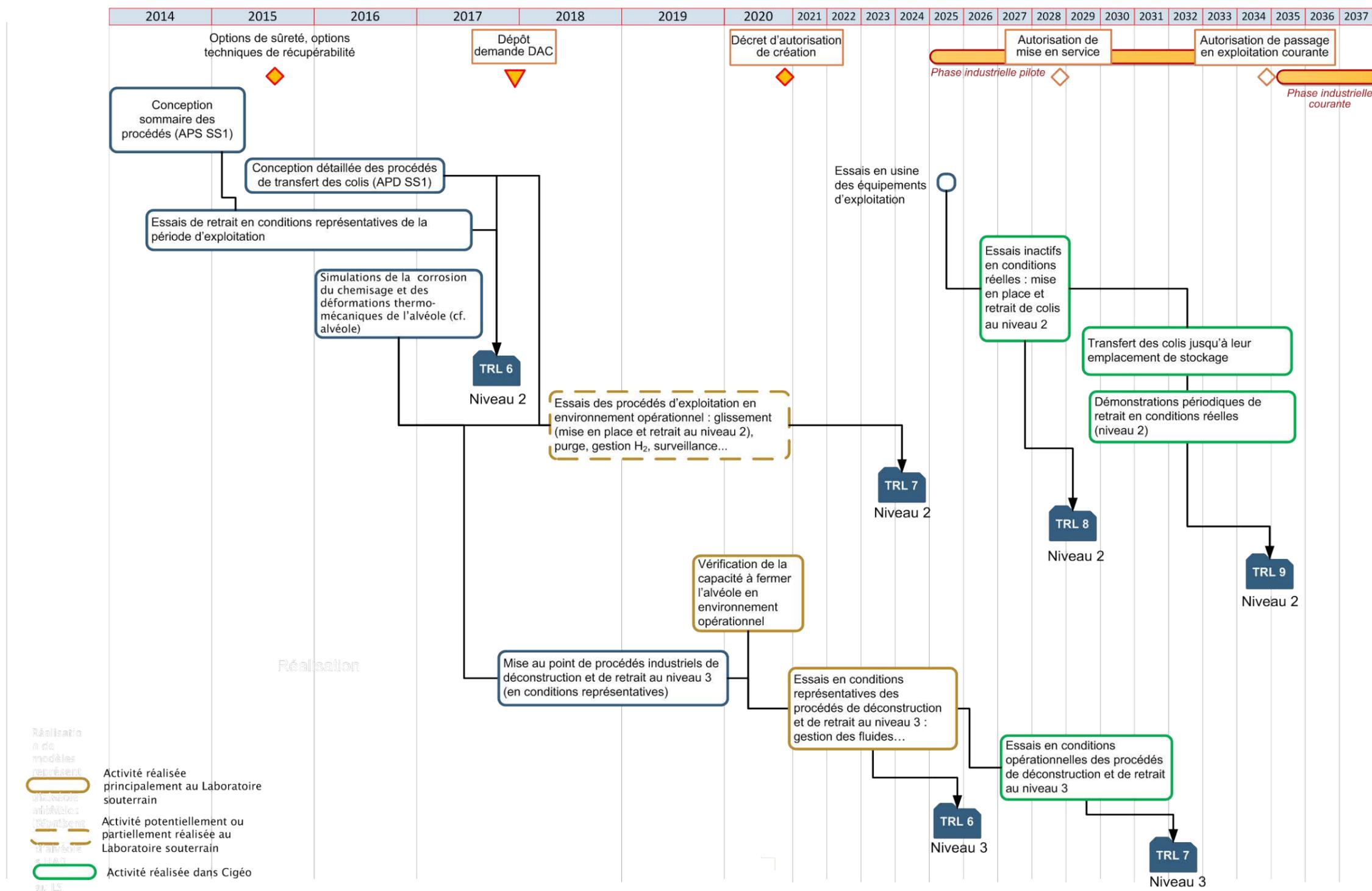


Figure 5.6-1 Logigramme des études et travaux sur l'exploitation des quartiers de stockage des déchets de haute activité d'ici au passage à l'exploitation industrielle courante de Cigéo

6. Liaisons surface-fond et galeries de liaison

Ce chapitre traite de l'ensemble des ouvrages de génie civil permettant de relier les quartiers de stockage aux installations de surface : descenderie et puits de liaison surface-fond, galeries de liaison souterraines, soutien logistique situé au fond. Les moyens de transfert des colis de déchets entre la surface et l'installation souterraine sont également couverts.

6.1 Solutions techniques étudiées

Le transfert des colis de déchets s'effectue par un tube de descenderie. Un second tube est prévu pour optimiser la sécurité du chantier de construction puis de l'exploitation de la descenderie, en offrant une voie d'accès et d'évacuation de secours. Pendant la période d'exploitation de Cigéo, ce deuxième tube est utilisé comme accès de service à l'installation souterraine. Les deux tubes sont prévus d'être creusés au tunnelier à attaque globale⁸⁰. Des puits verticaux complètent les liaisons surface-fond.

Vis-à-vis de l'EDZ, le Laboratoire souterrain a montré le caractère plus favorable de l'unité silto-carbonatée située en partie supérieure de la couche argileuse du Callovo-Oxfordien. Les scellements des liaisons surface-fond seront réalisés au niveau de cette unité.

Les galeries de liaison jusqu'aux quartiers de stockage sont implantées au même niveau que ces derniers. Dans le cadre de la première tranche de travaux de Cigéo, l'esquisse industrielle de Cigéo prévoit que des galeries de liaison soient creusées au tunnelier dans la continuité des tubes de descenderie (pour se prolonger ensuite en tant que galeries d'accès aux tunnels de stockage de déchets MAVL, voir la section 4.5) ; d'autres galeries de liaison et logistiques sont réalisées à la MAP. Les tronçons de galeries de liaison destinés à accueillir un scellement lors de leur fermeture sont orientés parallèlement à la contrainte principale majeure (de même que les tronçons de galeries d'accès aux alvéoles MAVL à sceller).

Les pistes d'optimisation identifiées portent sur :

- les cadences de creusement ainsi que les types et épaisseurs de revêtements, dans la même logique que les galeries d'accès aux alvéoles de stockage ;
- la mutualisation des fonctions de certains ouvrages de liaison surface-fond en vue d'en optimiser le nombre et la section ;
- les linéaires d'ouvrages techniques et logistiques.

6.2 Fonctions et exigences

Vis-à-vis des fonctions de sûreté après-fermeture, le regroupement des ouvrages de liaisons surface-fond limite les flux d'eau entre l'installation souterraine et les formations sus-jacentes. Les longueurs des galeries de liaison entre les quartiers et les liaisons surface-fond contribuent à limiter et atténuer la migration des radionucléides mobiles (en réduisant la part d'activité susceptible d'atteindre les liaisons surface-fond).

De plus les ouvrages doivent être aptes à accueillir les scellements lors de leur fermeture (pour s'opposer à la circulation d'eau à long terme, voir le chapitre 7). Cela se traduit au droit des futurs scellements par :

- la maîtrise de l'EDZ, aux plans de la conductivité hydraulique longitudinale de la zone d'argilites fracturée⁸¹ (cette conductivité contribue à la performance hydraulique globale du scellement) et de l'extension de cette zone fracturée (cette extension détermine la longueur minimale à conférer aux éventuelles saignées d'interruption de l'EDZ),

⁸⁰ La technique du tunnelier est particulièrement bien adaptée à la réalisation de galeries de longueur pluri-kilométrique. Elle offre dans cette configuration des cadences d'avancement et des conditions de sécurité de chantier optimales.

⁸¹ Le concept de référence en matière de scellement mobilise la capacité d'auto-cicatrisation des argilites. Un EDZ initial présentant une conductivité hydraulique aussi faible que techniquement possible constitue en tout état de cause un facteur de robustesse.

- l'adéquation du revêtement avec une dépose locale en tout ou partie au terme de la période d'exploitation (faisant partie de la technologie de scellement, l'opération de dépose est traitée à la section 7.1),
- la compatibilité chimique de la part de revêtement laissée en place, le cas échéant, avec le noyau argileux de scellement (l'utilisation d'un béton bas pH limite la perturbation alcaline de l'argile gonflante, voir aussi la section 7.1).

Pour la période d'exploitation, les ouvrages et leurs équipements d'exploitation permettent le transfert des colis de déchets depuis la surface jusqu'aux quartiers de stockage et la construction progressive de nouveaux alvéoles de stockage au rythme fixé par le PIGD, la récupération éventuelle de colis et leur transfert jusqu'à la surface, l'acheminement des flux de matériaux pour fermer les quartiers de stockage ainsi que des autres flux nécessaires à l'exploitation (réseaux de puissance, contrôle commande, surveillance, ventilation). Ces besoins ainsi que la capacité à maintenir l'installation aux niveaux 2 puis 3 de récupérabilité impliquent une maintenabilité mécanique des ouvrages sur la durée d'exploitation de Cigéo à l'instar des galeries d'accès aux alvéoles de stockage.

En matière de sûreté et de sécurité en exploitation, l'organisation spatiale des ouvrages contribue à la maîtrise du risque lié à la co-activité (séparation physique des activités) et à la sécurité incendie. Le revêtement des liaisons surface-fond à la traversée des formations aquifères réduit le risque d'inondation interne.

En termes de sécurité et sûreté en exploitation, la conception des équipements de transfert des colis de déchets vise à :

- assurer le maintien de l'intégrité des hottes de transfert dans toutes les situations (collision, chute d'objets) ;
- limiter l'exposition externe du personnel aux rayonnements à un niveau aussi bas que raisonnablement possible (système piloté à distance, limitation des temps d'intervention en situation dégradée ou lors des opérations de maintenance) ;
- minimiser par conception les risques vis-à-vis de l'incendie (choix d'un dispositif de transfert incliné type funiculaire en descenderie plutôt que des véhicules automoteurs sur pneumatiques, réduction des charges calorifiques embarquées...);
- posséder, en cas de défaillance, des modes de repli permettant de revenir dans une configuration sûre et permettant ultérieurement une intervention humaine dans des conditions de débit de dose acceptables (redondance de certains composants).

Par rapport à l'expérience industrielle des travaux souterrains, le caractère spécifique de l'exigence d'aptitude au scellement conduit à considérer celle-ci comme critique (au sens de l'application de l'échelle TRL), particulièrement pour les galeries de liaison dans l'unité argileuse du Callovo-Oxfordien, moins favorable que l'unité silto-carbonatée.

De manière générale, les fonctions des ouvrages de liaison liées à l'exploitation de Cigéo peuvent s'appuyer plus largement sur l'expérience industrielle.

Le transfert des colis de déchets entre la surface et le fond et la maîtrise de sa sûreté font appel à des technologies éprouvées dans d'autres contextes ; cependant le caractère innovant de l'application de ces technologies à Cigéo rendent ces fonctionnalités critiques (au sens de l'application de l'échelle TRL).

6.3 Liaisons surface-fond

Une première analyse industrielle des besoins en liaisons surface-fond nécessaires à la construction et à l'exploitation de Cigéo a été réalisée par la maîtrise d'œuvre système au stade de l'esquisse.

Dans le cadre des études d'APS et d'APD (2014-2017), les maîtrises d'œuvre du projet Cigéo optimisent le nombre et les sections des liaisons surface-fond. Elles conçoivent leur soutènement-revêtement dans le respect des exigences de maintenabilité mécanique sur la période d'exploitation, d'aptitude au scellement, de sûreté vis-à-vis du risque d'inondation interne et de l'aléa sismique, et intègrent des dispositifs de surveillance :

- Du point de vue de la stabilité mécanique des liaisons surface-fond pendant la construction puis l'exploitation, leur partie terminale située dans l'unité argileuse du Callovo-Oxfordien supporte les conditions d'environnement mécanique les plus contraignantes (caractéristiques de l'unité argileuse à la profondeur du stockage, orientations variées des tubes de descenderie par rapport aux directions des contraintes principales⁸²), conditionnant les spécifications des équipements de creusement. En plus de l'expérience des travaux souterrains et des règles du génie civil, la maintenabilité mécanique des liaisons surface-fond s'appuie sur les mêmes études et recherches que les galeries d'accès aux alvéoles de stockage (§ 4.5.2) ; cela comprend notamment des essais de mise au point de tunnelier dans l'unité argileuse au Laboratoire souterrain et la réalisation d'une galerie normale à la contrainte principale majeure à l'aide d'un bouclier (GVA2).
- L'aptitude au scellement des liaisons surface-fond conçues par les maîtrises d'œuvre est vérifiée par simulations⁸³. Les conditions mécaniques plus sévères de l'unité argileuse conduisent à focaliser les démonstrations expérimentales d'ici à la construction de Cigéo sur cette unité (voir les galeries de liaison *infra*).
- Vis-à-vis du risque d'inondation interne, des revêtements drainants ou étanches au droit de l'Oxfordien calcaire sont comparés d'un point de vue technique (notamment la sûreté de Cigéo et l'impact local sur les ressources en eau) et économique afin de proposer un choix en la matière.

La construction des liaisons surface-fond sera engagée suite à l'autorisation de création de Cigéo. A l'instar des quartiers de stockage, elle nécessite au préalable une préparation de moyens industriels :

- fabrication des équipements de creusement spécifiques (tunneliers, plateformes de fonçage de puits) ;
- mise en place d'une chaîne d'approvisionnement des chantiers en matériaux de construction et éléments de structure (voussoirs en béton notamment).

Des essais de convenance des éléments préfabriqués sont réalisés avant leur expédition vers le site. L'EDZ est caractérisé à l'avancement du creusement de manière à réduire les risques de non-conformité, particulièrement au droit des futurs scellements.

L'évolution mécanique des liaisons surface-fond est suivie dans le cadre de la phase industrielle pilote (puis au-delà), notamment au moyen de tronçons d'observation instrumentés. Un ouvrage est construit spécifiquement dans l'unité silto-carbonatée pour accueillir un démonstrateur de scellement de descenderie (voir la section 7.1). Cet ouvrage est identique aux tubes de descenderie. Il fait notamment l'objet d'une dépose du revêtement dans le cadre de la construction de ce démonstrateur.

6.4 Galeries de liaison, ouvrages souterrains de soutien logistique

6.4.1 Etat des lieux

A l'instar des liaisons surface-fond, la maîtrise d'œuvre système a analysé au stade de l'esquisse les besoins en galeries de liaison et ouvrages logistiques permettant d'assurer les différents flux et de respecter les objectifs de sûreté en exploitation (séparation des activités, sécurité incendie...) et à long terme.

En matière de creusement et de soutènement-revêtement, l'état des lieux présenté plus haut pour les tunnels de stockage et les galeries d'accès du quartier MAVL s'applique aussi aux galeries de liaison :

⁸² L'architecture de l'installation souterraine au stade de l'enclenchement des études d'APS prévoit des virages des tubes de descenderie dans l'unité argileuse.

⁸³ Les simulations numériques déjà réalisées rendent compte de l'effet du faciès sur la géométrie des zones endommagées, avec notamment la quasi non existence d'extension plastique au-delà du pic dans l'unité silto-carbonatée, en cohérence avec les observations in situ.

- Des galeries représentatives ont été construites au Laboratoire souterrain à la MAP⁸⁴ avec soutènement par béton projeté et boulonnage, dans les directions des contraintes principales horizontales majeure et mineure.
- Des revêtements de rigidités différentes ont été testés dans la direction de la contrainte principale majeure (celle des tronçons à sceller). L'EDZ a été caractérisé : structure, origine des fractures créées lors du creusement, extension.
- Une galerie parallèle à la contrainte principale majeure a été construite à l'aide d'un bouclier avec pose de voussoirs sans boulonnage.

6.4.2 Conception, démonstration de performance en environnement représentatif (2014-2017/2018 ; TRL 6)

Comme pour les liaisons surface-fond, les maîtrises d'œuvre du projet Cigéo optimisent le linéaire et les sections des galeries de liaison et ouvrages logistiques dans le cadre des études d'APS et d'APD (2014-2017).

Les maîtrises d'œuvre déclinent les exigences de maintenabilité mécanique⁸⁵, de résistance à l'aléa sismique ainsi que d'aptitude au scellement (pour les tronçons concernés) sur la conception des soutènements et des revêtements et leur surveillance.

Comme pour les galeries d'accès aux alvéoles de stockage, cette conception se fonde sur l'expérience des grands travaux souterrains, les règles du génie civil et la base de connaissances du Laboratoire souterrain. Elle bénéficie des connaissances apportées par de nouveaux essais *in situ* au Laboratoire :

- la réalisation de tronçons de galerie normale à la contrainte principale majeure, testant une section proche de celle des galeries de liaison (GVA1) ainsi que différentes rigidités de soutènement-revêtement (GER, § 4.5.2.), pour évaluer la maintenabilité mécanique des ouvrages orientés dans cette direction ;
- le creusement en deux phases d'une galerie parallèle à la contrainte principale majeure (GRM3, § 4.4.2), pour évaluer l'impact du mode de creusement sur l'EDZ au droit de futurs scellements.

Concernant la maintenabilité mécanique sur la période d'exploitation de Cigéo, les travaux de l'Andra en matière d'observation au Laboratoire, de modélisation et de simulation, présentés plus haut pour les galeries d'accès aux tunnels de stockage MAVL, considèrent aussi les galeries de liaison. Leur application aux tronçons de galerie à sceller tient compte de l'utilisation de béton bas pH ; les travaux en modélisent l'évolution physico-chimique propre (couplages chimie-mécanique) et le comportement mécanique.

En parallèle les maîtrises d'ouvrage définissent la stratégie de maintenance des différents types d'ouvrages en fonction des besoins en disponibilité industrielle et des coûts.

Pour l'aptitude des galeries de liaison au scellement, l'évolution de la zone endommagée autour de galeries du Laboratoire souterrain est observée, notamment en termes de déformations, d'étendue et de propriétés hydrauliques (essai OHZ). Un enjeu particulier réside dans la limitation de la conductivité hydraulique et de l'extension de l'EDZ des tronçons à sceller dans le cas d'une réalisation au tunnelier ; les essais de mise au point de creusement au bouclier mentionnés plus haut (§ 4.5.2.) prennent en compte cet objectif.

Vis-à-vis de la contribution des galeries de liaison à la limitation et à l'atténuation de la migration des radionucléides après fermeture, l'Andra évalue, par simulations, la sensibilité des indicateurs de transfert des radionucléides (flux molaires, temps d'occurrence des maxima...) aux distances entre

⁸⁴ Pour mémoire, cette technique a été testée jusqu'à un diamètre de près de 8 mètres correspondant à une section de près de 50 m² (GRD3).

⁸⁵ L'utilisation de chaque type d'ouvrage est prise en compte pour définir la réponse technique adaptée au plan technico-économique à l'exigence de maintenabilité mécanique : durabilité mécanique des dispositifs de soutènement, programmation éventuelle d'opérations de maintenance.

quartiers de stockage et liaisons surface-fond. Cette étude de sensibilité vise à conforter la justification des distances qui ont été retenues pour les études d'esquisse et d'APS [5].

6.4.3 Démonstration des performances en environnement opérationnel (2018-2024 ; TRL 7)

Comme cela a été mentionné plus haut pour les galeries d'accès aux tunnels de stockage (§ 5.5.3), la recherche d'un TRL 7 pour les galeries de liaison avant leur construction dans Cigéo peut conduire à réaliser des ouvrages d'essais au Laboratoire souterrain aussi représentatifs que possible, d'en caractériser l'EDZ, particulièrement la conductivité hydraulique et l'extension, et d'en suivre l'évolution. Le besoin de tels essais est instruit à l'issue des études d'APD concomitamment aux galeries d'accès aux alvéoles. Les simulations numériques des performances mécaniques des galeries de liaison sur la durée d'exploitation et après fermeture (évolution de l'EDZ en lien avec le scellement, voir le chapitre 7) sont tenues à jour en intégrant la poursuite des observations de l'évolution des ouvrages du Laboratoire et des développements de la modélisation mécanique des argilites.

6.4.4 Qualification et mise en œuvre (TRL 8, TRL 9)

La construction et la recette des galeries de liaison et ouvrages logistiques s'effectuent de la même façon que les liaisons surface-fond (voir supra, § 6.3). Leur évolution mécanique est suivie dans le cadre de la phase industrielle pilote (puis au-delà).

Plusieurs tronçons de galerie identiques aux tronçons à sceller sont construits dans l'unité argileuse :

- Deux tronçons d'observation situés respectivement à proximité de l'entrée d'air et du retour d'air de Cigéo permettent de suivre l'évolution du revêtement et de la roche derrière la paroi (déformations, désaturation...) au cours de l'exploitation.
- Un autre tronçon accueille un démonstrateur de scellement de galerie [5].

Déroulement des travaux sur les liaisons surface-fond et les galeries de liaison

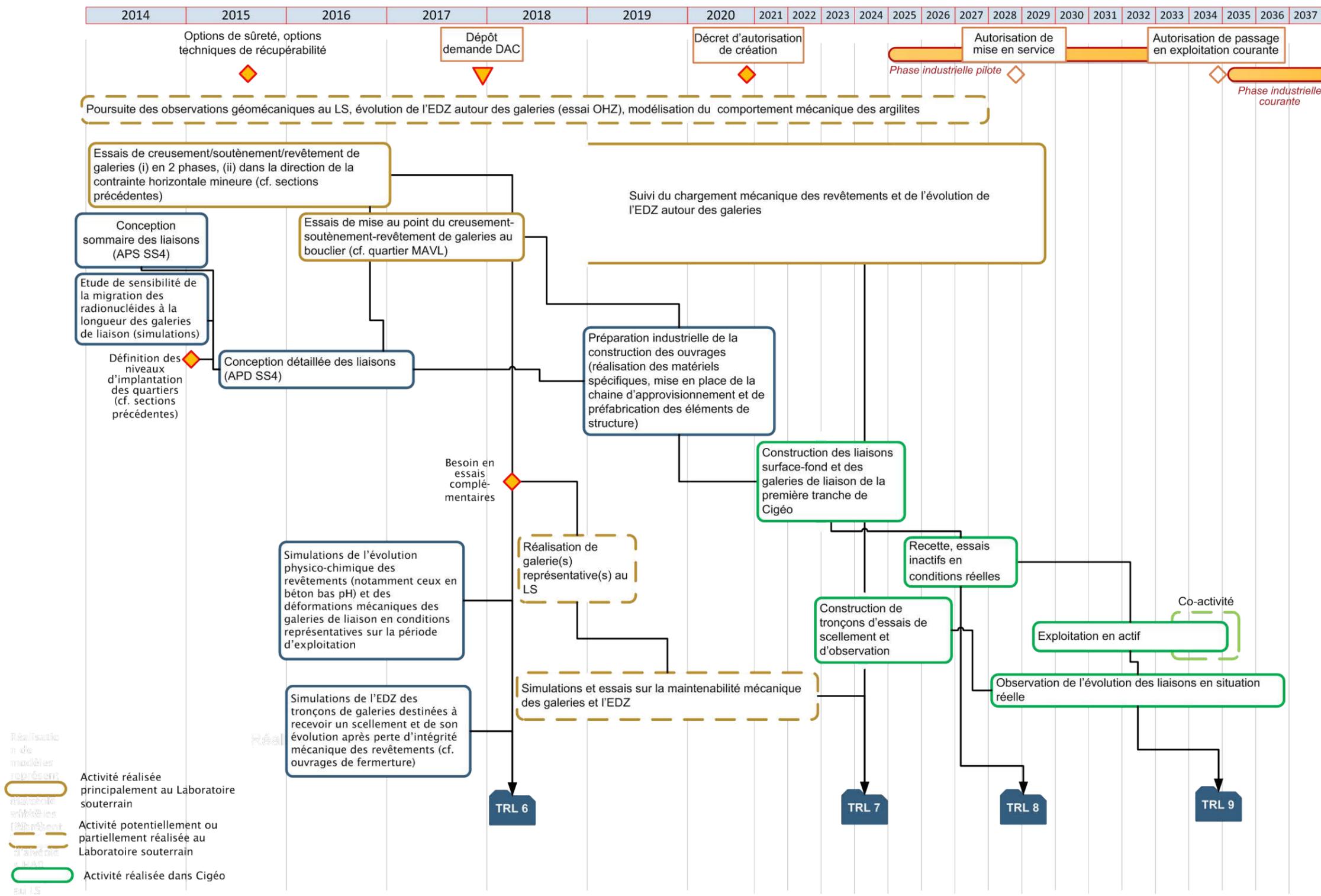


Figure 6.4-1 Logigramme des études et travaux sur les liaisons surface-fond et les galeries de liaison

6.5 Moyens de transfert de colis de déchets

6.5.1 Etat des lieux

Pour le transfert des colis de déchets entre la surface et l'installation souterraine, les analyses techniques et de sûreté menées depuis 2009 ont conduit au choix d'un transfert incliné par câble de type funiculaire du fait, entre autres, de sa faible charge calorifique réduisant le risque incendie. La faisabilité de ce procédé de transfert est démontrée sur la base des études réalisées depuis 2009 et de l'expérience industrielle acquise notamment dans le domaine du transport des personnes. Cependant la spécificité de son application aux colis de déchets sous hottes (charge supérieure à 100 tonnes, systèmes de freinage redondants pour répondre aux exigences de sûreté nucléaire...) nécessite d'en valider les principes et simulations. Cette application est considérée à ce stade comme se trouvant au TRL 5.

6.5.2 Conception (2014-2017/2018 ; TRL 6)

Les maîtrises d'œuvre sont chargées de définir les moyens de transfert des colis (au stade de l'APS en 2015 puis de l'APD en 2017) et d'en justifier la conception sur la base de conditions d'environnement représentatives, notamment :

- masses et géométries des hottes contenant les colis à transférer ;
- pente, gabarit contraint de la descenderie ;
- température, hygrométrie ;
- débit de dose.

6.5.3 Démonstration des performances en environnement opérationnel (2018-2024 ; TRL 7)

A l'instar des moyens de mise en place et de retrait présentés dans les sections précédentes, l'Andra prévoit d'amener les composants sensibles des moyens de transfert des colis de déchets au TRL 7 avant d'installer les équipements industriels de Cigéo. La confirmation de cet objectif et la détermination plus précise des composants à tester se fondent sur les études d'APD à l'horizon 2016/2017.

A ce stade, l'Andra envisage la mise en place d'un banc d'essai du système de transfert incliné en descenderie à l'échelle 1/1, comprenant :

- environ 70 m de rails avec une pente de 12 % autorisant une course de véhicule de 60 m, terminée par les butoirs avals ;
- un véhicule quasi identique au véhicule final, lesté avec une masse correspondant à celle des hottes et munis des différents types de freins retenus par la conception.

Ce banc permet de tester le comportement des rails, du véhicule lesté et notamment les performances des dispositifs de freinage. Dans l'ensemble, ces essais se déroulent pour différentes vitesses⁸⁶, différents cas de charge et en simulant les plages des conditions d'environnement opérationnel (rails secs, humides, graissés ou non, rouillés ou non ; matériaux ; températures...).

6.5.4 Qualification et mise en œuvre (TRL 8, TRL 9)

Les essais en usine permettent de vérifier la conformité de la fabrication, du montage et du fonctionnement des équipements de base (sous réserve de faisabilité et de pertinence hors site) dont notamment la conformité quantitative avec contrôle du repérage des équipements, les fonctionnalités et performances de chaque équipement⁸⁷.

⁸⁶ Le véhicule sera lâché du sommet du banc d'essai puis remonté à sa position initiale par un treuil ou un pont roulant.

⁸⁷ Ces essais en usine visent à vérifier les performances de composants ou éléments classés EIP pour lesquels il n'existe pas de retour d'expérience en milieu nucléaire.

Les essais sur site sont décomposés comme suit :

- Essais de vérification statique de fin de montage⁸⁸ sur des ensembles ou des sous-ensembles (réception mécanique) ;
- Essais de lot⁸⁹ permettant de s'assurer du bon fonctionnement des composants et sous-systèmes (réalisés en inactif) : essais des automatismes à blanc et de l'instrumentation, essais des systèmes fonctionnels regroupant plusieurs équipements, essais de fonctionnement en phase normale et en phase défaut⁹⁰,
- Essais d'intégration, permettant de vérifier le fonctionnement global de l'installation et de l'ensemble des systèmes et fonctionnalités, les conditions d'intervention, de conduite et de maintenance, l'ensemble des performances contractuelles.

⁸⁸ Les vérifications statiques couvrent notamment les points suivants : conformité quantitative avec contrôle du repérage des équipements, respect des plans et documents BPE, respect des règles de sécurité appliquées, contrôle des accès aux différents organes, contrôle des possibilités de montage et de démontage des appareils, leur introduction et extraction des installations par les moyens définis, épreuves et essais réglementaires (appareils sous pression, manutention...), liaisons électriques.

⁸⁹ Les essais de lot d'un système ne peuvent être engagés qu'après vérification formalisée de fin de montage et de recette, avec ou sans réserves.

⁹⁰ On s'assure au cours de ces essais que toutes les sécurités ont bien été prises en compte au niveau de la conception, par système.

Déroulement des travaux sur le transfert incliné de colis de stockage

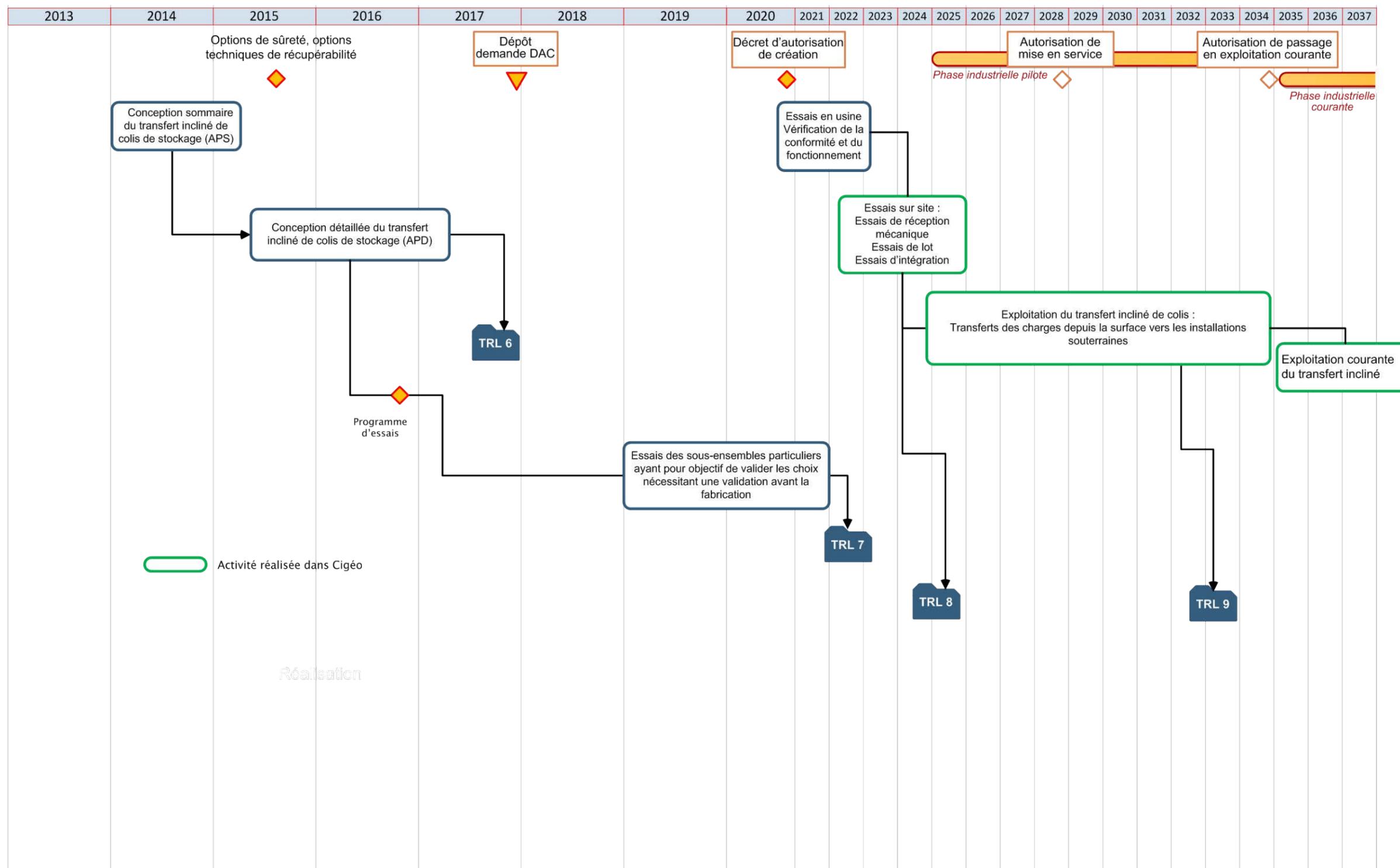


Figure 6.5-1 Logigramme des études et travaux sur le transfert des colis de déchets en descenderie

7. Ouvrages de fermeture

Ce chapitre traite les ouvrages de fermeture de Cigéo. Les principaux ouvrages de fermeture sont constitués de scellements localisés en des points particuliers de l'installation : scellements des ouvrages de liaison surface-fond, scellements de galeries de liaison et scellements des tunnels de stockage des déchets MAVL. Les autres ouvrages de fermeture sont les remblais et les bouchons des alvéoles HA.

7.1 Scellements

7.1.1 Solutions techniques étudiées

Le principe général de conception des différents scellements est identique que l'on considère un scellement de puits, un scellement de descenderie, un scellement de galerie de liaison ou encore un scellement de tunnel de stockage MAVL : un noyau à base d'argile gonflante (pure ou mélangée à des additifs naturels) encadré par deux massifs d'appui en béton et un remblai à l'arrière des massifs d'appui.

Deux options de conception des scellements placés dans l'unité argileuse du Callovo-Oxfordien sont développées en parallèle, le choix entre ces options n'ayant à intervenir que lorsque de premiers scellements réels seront construits dans Cigéo (au-delà de la phase industrielle pilote) : (i) en référence, le noyau argileux de faible perméabilité est placé en contact direct avec les argilites après dépose du soutènement/revêtement ; (ii) en variante des coupures hydrauliques radiales sont réalisées dans les argilites en complément du noyau⁹¹.

Les éléments de mise en œuvre suivants sont retenus sur la base (i) des résultats des études, recherches et essais réalisés notamment au Laboratoire souterrain, (ii) de la recherche des meilleures techniques disponibles :

- Noyau en argile gonflante :
 - mise en place sous forme de pellets à base d'argile gonflante type MX80⁹², visant à une densité sèche finale à la mise en place de 1,5 environ (correspondant aux performances hydrauliques et mécaniques précisées plus loin) ;
 - dépose complète du revêtement des puits et descenderies au moment de la mise en place du noyau argileux dans l'unité-silto-carbonatée^{93 94} ;
 - dépose du revêtement au droit du noyau des scellements de galerie et des scellements d'alvéoles MAVL, par petites portions espacées sur une longueur cumulée de quelques mètres⁽⁹⁴⁾ ;
- Eventuelles coupures hydrauliques : 3 à 5 coupures placées à intervalles réguliers consistant en des saignées d'épaisseur 30 cm réalisées à la scie, remplies par un matériau à base d'argile gonflante mis en place sous forme de pièces compactées ou de pellets (visant à une perméabilité à saturation maximale de $10^{-11} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) ; la profondeur visée pour les saignées est de l'ordre de 0,8 fois le rayon excavé, soit environ 3,5 m pour une section d'ouvrage de 65 m² ;

⁹¹ Dans le cadre de l'instruction en 2014, par l'ASN, du dossier relatif aux ouvrages de fermeture, l'Andra s'est engagée par courrier du 1^{er} Juin 2014 à poursuivre « *ses investigations pour développer la variante du scellement de galeries avec coupures hydrauliques jusqu'au stade du prototype dans le cadre de la phase industrielle pilote* ». Le Groupe permanent d'experts auprès de l'ASN (GPD) recommande dans son avis du 16 juillet 2014 de « *poursuivre activement le développement d'un concept de scellement de fond avec coupures hydrauliques de l'EDZ.* »

⁹² La forme des pellets et la distribution de leurs tailles sont choisies pour atteindre la densité spécifiée pour le noyau tout en limitant la ségrégation et assurer ainsi une mise en place homogène. Une mise en place de briques d'argile gonflante compactée, telle que retenue pour l'essai NSC réalisé au Laboratoire souterrain, constitue une solution alternative à la mise en place sous forme de pellets.

⁹³ Pour des raisons de stabilité de l'ouvrage lors de la dépose, des anneaux porteurs pourront être maintenus en tant que de besoin.

⁹⁴ Au droit des zones où le revêtement est déposé, la surface d'argilite qui apparaîtrait altérée ou fracturée sera traitée (purge, surfacage...) pour assurer un bon contact entre l'argilite et l'argile du noyau de scellement. Les zones de dépose sont remplies avec un matériau similaire à celui du noyau argileux.

- Massifs d'appui (et pour mémoire revêtements au droit et à proximité⁹⁵ du noyau, voir supra chapitre 6) : formulation de type béton bas pH.

7.1.2 Fonctions et exigences

La fonction principale des scellements est de s'opposer à la circulation d'eau⁹⁶. Si cette fonction mobilise en premier lieu les caractéristiques hydrogéologiques du site et l'architecture de l'installation souterraine, les scellements y contribuent également par une faible conductivité hydraulique et une localisation optimale de chacun d'eux⁹⁷. Il s'agit d'une fonction critique (au sens de l'application de l'échelle TRL).

Les performances de l'ensemble du système de scellement de Cigéo sont évaluées par simulations au moyen d'indicateurs de circulation d'eau dans le stockage. Ces simulations intègrent les performances de chacun des scellements et leurs localisations dans les liaisons surface-fond et l'installation souterraine. Elles se fondent aussi sur la modélisation hydrogéologique du site, notamment la connaissance des gradients dans la couche argileuse et de leur évolution à long terme. L'optimisation du système de scellement suppose une démarche itérative impliquant des évaluations de performances d'ensemble et le remontage de l'architecture de l'installation souterraine.

Dans la suite on s'attache à la performance hydraulique de chaque scellement évaluée par sa conductivité globale, et permettant de justifier les valeurs retenues pour les simulations de performances d'ensemble du système. L'objectif est d'atteindre et de maintenir une perméabilité du scellement à saturation la plus petite possible, inférieure ou égale à 10^{-9} m.s⁻¹ (⁹⁸). Cet objectif se décline sur chaque composante du scellement, et s'accompagne d'exigences de performance mécanique :

- Noyau à base d'argile gonflante :
 - perméabilité homogénéisée à saturation du noyau et de son interface avec les matériaux à son contact de l'ordre de 10^{-11} m/s ;
 - pression de gonflement du noyau saturé, autour de quelques mégapascals, pour limiter la possibilité d'une réactivation de la zone endommagée et *a contrario* favoriser une fermeture mécanique des fissures et contribuer ainsi à réduire la conductivité hydraulique de la zone fracturée ;
- Interface entre le noyau et les argilites : contact direct entre l'argile gonflante du noyau et les argilites suite à la dépose du revêtement ;
- Zone fracturée avec coupures hydrauliques éventuelles : perméabilité équivalente inférieure à 10^{-9} m.s⁻¹.

Les massifs en béton à bas pH de part et d'autre du noyau assurent son confinement mécanique (particulièrement durant la phase transitoire de saturation du noyau) tout en limitant la perturbation alcaline de l'argile, de manière à préserver durablement sa capacité de gonflement et sa faible perméabilité.

Les scellements, particulièrement leurs massifs d'appui, doivent résister mécaniquement aux différences éventuelles de pression de fluide de part et d'autre, en tenant compte de la formation et de la montée en pression de gaz dans l'installation souterraine.

⁹⁵ jusqu'à une distance au moins égale à un diamètre de l'ouvrage de part et d'autre du noyau

⁹⁶ Les scellements des liaisons surface-fond assurent le rôle le plus important. Ils limitent les flux d'eau entre l'installation souterraine et les formations sus-jacentes. Les scellements mis en place dans les galeries augmentent la résistance hydraulique de ces dernières et contribuent à l'organisation des gradients hydrauliques, des flux et des vitesses d'écoulement dans l'installation. Les scellements d'alvéoles de déchets MAVL participent au confinement au plus près des déchets.

⁹⁷ Le Guide de sûreté indique : « *Les fonctions, les performances et les caractéristiques des composants ouvrages devront être définies et justifiées en rapport avec celles des colis et de la roche hôte, car ils interviennent en complément de ces deux composants pour pallier d'éventuelles faiblesses. (...) Les liaisons jour-fond et éventuellement certaines galeries et certains ouvrages de l'installation de stockage devront faire l'objet de scellements assurant une étanchéité de qualité spécifiée. Cette préoccupation doit être intégrée dès leur conception* » [4].

⁹⁸ Ce critère a été fixé à partir de l'état des connaissances et des évaluations de performances déjà réalisées, et prend en compte la faisabilité technologique industrielle et la capacité de démonstration.

7.1.3 Etat des lieux (TRL 5)

Le niveau actuel de définition des scellements ainsi que les vérifications expérimentales et les évaluations de performances d'ores et déjà réalisées confèrent aux scellements le TRL 5 ⁽⁹⁹⁾.

Noyau à base d'argile gonflante

Il existe un important retour d'expérience quant au comportement de matériaux à base d'argile gonflante (notamment la corrélation entre la densité, la pression de gonflement et la perméabilité), leur mise en forme et leur mise en place, notamment *in situ* dans des configurations proches ou identiques à celles des scellements de Cigéo. Différents types d'argile gonflante et différents modes de mise en forme (briques, pellets, par damage, par injection...) et corrélativement de mise en place ont ainsi été testés seuls ou de manière combinée de l'échelle métrique à pluri-métrique, pour des volumes pouvant aller jusqu'à environ 100 m³, en configuration horizontale (type scellement de galerie ou d'alvéole MAVL) ou verticale (type scellement de puits). La faisabilité de la mise en place du noyau d'argile gonflante a d'ores et déjà été démontrée expérimentalement jusqu'à une échelle verticale de 5 à 6 mètres pour ce qui concerne les ouvrages horizontaux. Pour les puits, la verticalité est une aide à la mise en place et contribue à ce que celle-ci ne pose pas de problème particulier.

Massifs d'appui en béton bas pH

La construction de massifs en béton bas pH a été développée dans le cadre de projets de recherche internationaux et démontrée expérimentalement en environnement représentatif (Essai TSX au laboratoire souterrain canadien de Lac du Bonnet, projet européen Esdred).

Coupures hydrauliques

Le programme expérimental mené par l'Andra d'abord au laboratoire souterrain du Mont Terri puis au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne a permis de vérifier, à une échelle plus petite que celles des ouvrages de Cigéo¹⁰⁰ (i) la faisabilité technologique du creusement et du remplissage de saignées et (ii) leur efficacité vis-à-vis de l'interruption hydraulique de la zone fracturée. En particulier, les vérifications expérimentales suivantes ont été réalisées *in situ* au Laboratoire souterrain : très faible sur-endommagement des argilites suite au creusement de la saignée, y compris à l'intersection avec la galerie et peu/pas de déformations des argilites ; augmentation significative des vitesses des ondes de compression dans les argilites endommagées lors de l'application d'une pression représentative de la pression de gonflement d'une argile gonflante, signe d'une fermeture mécanique des fractures ; capacité de saignées remplies à interrompre la connectivité des argilites fracturées (essais d'interférence au gaz et de traçage à l'hélium de part et d'autre d'une saignée remplie de résine).

Performances globales des scellements

L'aptitude des concepts de scellements à assurer les performances hydrauliques attendues a été évaluée par un ensemble d'analyses phénoménologiques et de simulations, fondées notamment sur les connaissances acquises *in situ* et sur échantillons de matériaux en laboratoire. Ces travaux se sont attachés aux processus d'évolution chimique en tenant compte des interactions entre matériaux, au transitoire hydraulique-gaz et aux écoulements au sein du stockage, au comportement hydromécanique des scellements [11].

⁹⁹ Dans son avis du 16 juillet 2014 concernant le dossier relatif aux ouvrages de fermeture, le groupe permanent d'experts auprès de l'ASN (GPD) indique ne pas avoir « *identifié de difficulté majeure quant à la faisabilité industrielle des concepts de référence retenus pour les ouvrages de fermeture* » et conclut que « *le dossier examiné constitue une avancée majeure en matière de faisabilité industrielle de la fermeture de l'installation de stockage* » tout en soulignant « *l'importance d'essais in situ à l'échelle 1 qui seront à réaliser durant la phase pilote* ».

¹⁰⁰ La dernière saignée complète creusée au Laboratoire souterrain en juillet 2011 est restée auto-stable depuis lors (essai TSS1 dans la galerie GET). Un premier retour d'expérience d'un remplissage par briques d'argile gonflante compactée a pu être obtenu dans le laboratoire du Mont-Terri avec un taux de vides technologiques satisfaisant de quelques pourcents. L'essai SET de remplissage d'un modèle de saignée de dimensions représentatives, réalisé en surface au CMHM fin 2013, apporte une démonstration technologique complémentaire en mettant en œuvre une méthode à caractère plus industriel. Il est envisageable de prolonger cet essai par le remplissage de la saignée déjà creusée au Laboratoire souterrain et le suivi de son évolution avec resaturation artificielle.

7.1.4 Evaluation en environnement représentatif des performances hydrauliques et mécaniques des scellements (TRL 6), préparation des démonstrateurs de Cigéo

Les travaux menés sur les scellements sur la période 2013-2020 visent l'atteinte du TRL 6 à l'horizon 2017 et préparent la réalisation de démonstrateurs dans Cigéo (Figure 7.1-1).

Ils se focalisent sur les scellements de galerie ou de descenderie plutôt que sur les scellements de puits. En effet, la verticalité de ces derniers rend leur mise en œuvre moins complexe. De plus leur implantation dans l'unité silto-argileuse est plus favorable au plan géotechnique que celle des scellements de galeries. Enfin différents essais en laboratoires souterrains, dont en particulier l'essai de scellement de puits « Enhanced Sealing Project » réalisé avec l'EACL¹⁰¹ au laboratoire canadien de Lac du Bonnet, apportent des éléments de démonstration complémentaires.

Une démonstration technologique en vraie grandeur (échelle décimétrique) de la construction d'un scellement horizontal est réalisée dans le cadre de l'essai FSS¹⁰² (en surface). Elle permet de vérifier la capacité à atteindre, à cette échelle, les caractéristiques spécifiées pour le noyau (§ 7.1.1) et pour les massifs d'appui en béton bas pH¹⁰³. Les contrôles effectués *a posteriori* portent notamment, pour le noyau argileux, sur la densité sèche de mise en place et le vide résiduel, et pour les bétons des massifs d'appui, sur leurs propriétés mécaniques et leur homogénéité.

Les principales conditions d'environnement et d'interaction à prendre en compte pour justifier le dimensionnement des composantes des scellements (notamment la longueur et la géométrie des massifs d'appui, la longueur du noyau) et leurs performances globales sont les suivantes :

- Les pressions de fluide (eau et gaz) s'appliquant sur les composantes des scellements (différences de pression de part et d'autre des scellements, gradients s'établissant à l'intérieur) ; la caractérisation de ces conditions implique l'ensemble des termes sources de gaz, des volumes d'expansion, des surfaces d'échange avec les argilites et des voies d'écoulement à l'échelle de l'installation souterraine ;
- Les caractéristiques de la zone d'argilites fracturées initiale (voir supra, chapitre 6), l'impact mécanique sur cette zone du déconfinement lors de la dépose du revêtement, son évolution à long terme sous l'effet de la pression appliquée par l'argile gonflante, des pressions de gaz et des mécanismes d'auto-colmatage des fractures ;
- Le comportement hydromécanique de l'argile gonflante du noyau et des coupures hydrauliques éventuelles, notamment en présence d'une phase gazeuse sous pression¹⁰⁴ ;
- Le frottement des ouvrages de scellement, particulièrement les massifs d'appui, sur les parois de galerie ou de puits, le chargement mécanique progressif des massifs par le gonflement de l'argile du noyau et par les argilites ;
- Les interactions chimiques entre les massifs d'appui et tronçons de revêtement laissés en place, l'argile gonflante et les argilites au voisinage, susceptibles d'entraîner une évolution des caractéristiques de chacune de ces composantes.

Noyau

En matière de comportement hydro-mécanique de l'argile gonflante, un ensemble d'essais à échelle réduite et de simulations numériques sur les processus d'hydratation et de gonflement permet de

¹⁰¹ Energie Atomique du Canada Limitée

¹⁰² Cet essai s'inscrit notamment en réponse à l'avis suivant de l'ASN de juillet 2011 : « *L'Andra devra (...) présenter, préalablement au dépôt de la demande d'autorisation de création (...) les éléments nécessaires à la démonstration de la faisabilité industrielle d'une solution de scellements des galeries et des liaisons entre la surface et l'installation souterraine.* »

¹⁰³ Le coulage d'un premier massif d'appui a été effectué en 2013. L'essai prévoit aussi la construction d'un second massif d'appui avec une méthode alternative et un redan d'ancrage au parement.

¹⁰⁴ S'il n'est pas défini de fonction particulière des scellements vis-à-vis des gaz, ces derniers peuvent avoir un impact sur l'évolution mécanique des scellements et par conséquent sur leurs performances hydrauliques.

vérifier¹⁰⁵ que l'argile du noyau est apte, avec les caractéristiques spécifiées, à atteindre après saturation en eau les niveaux de perméabilité et de pression de gonflement recherchés¹⁰⁶.

- Essais de resaturation forcée de noyaux (essai NSC à l'échelle ½ au Laboratoire souterrain et essai REM à plus petite échelle en surface) ;
- Suivi *in situ* de la resaturation naturelle de noyau argileux à une échelle intermédiaire entre celle du forage et celle du scellement (essai BHN).

L'étude du transitoire hydro-mécanique de resaturation du noyau fournit aussi une charge mécanique à prendre en compte pour le dimensionnement des massifs d'appui (voir *infra*).

La présence d'une phase gazeuse implique des travaux particuliers :

- Poursuite des travaux de modélisation du comportement hydro-mécanique des matériaux argileux vis-à-vis des gaz,
- Essai au Laboratoire souterrain de comportement du noyau sur modèle réduit en présence de gaz (essai PGZ).

Une campagne d'essais sur modèle réduit est envisageable sur la période 2018-2020 pour compléter l'étude du comportement hydro-mécanique du noyau en lien avec le dimensionnement des massifs d'appui. Ce programme d'essai éventuel est à définir à l'horizon 2017 sur la base des résultats des modélisations hydrauliques-gaz à l'échelle du stockage, des observations effectuées au Laboratoire sur l'essai PGZ et du dimensionnement des scellements.

Massifs d'appui

Les massifs d'appui sont dimensionnés sur la base d'une part de leur chargement mécanique (gonflement des argilites et gradient de pression de fluides, voir *supra*), d'autre part du confinement mécanique du massif par la paroi de l'ouvrage scellé. Les facteurs intervenant sur ce confinement sont :

- la longueur et la géométrie conférées à l'interface massif-argilites dans le cadre de la conception des scellements,
- le comportement différé des argilites (cinétique de serrage des massifs),
- le revêtement de l'ouvrage scellé (transmission des efforts notamment par frottement).

Aussi la conception des massifs d'appui nécessite une meilleure connaissance des données de frottement – cisaillement aux interfaces, sur la base notamment d'essais au Laboratoire souterrain menés sur la période 2015-2016.

La conception des massifs d'appui requiert aussi la connaissance des caractéristiques mécaniques du béton retenu. L'optimisation des formulations de béton bas pH pour les massifs d'appui¹⁰⁷, leurs caractéristiques initiales, leur altération physico-chimique, l'impact de cette altération sur le comportement mécanique du béton ainsi que sur l'argile gonflante et les argilites voisines, font l'objet d'études et de recherches. Ces études et recherches s'appliquent également au revêtement laissé en place (§ 6.4).

Dépose du revêtement au droit du noyau, évolution de la zone d'argilites fracturées

Les concepts de scellements retenus appellent l'étude de la dépose, totale ou partielle, des dispositifs de soutènement des ouvrages à sceller, au droit du noyau. Ces études s'effectuent en lien avec celles du creusement, du soutènement et du revêtement de ces ouvrages présentées plus haut (§ 6.4). Les études réalisées par les maîtrises d'œuvre s'appuient notamment sur le retour d'expérience de

¹⁰⁵ Ces travaux de démonstration complètent l'essai technologique FSS présenté plus haut.

¹⁰⁶ L'Andra établit et tient à jour un « catalogue » des matériaux argileux, de leurs méthodes de mise en forme et de mise en place en lien avec les spécifications de perméabilité et de pression de gonflement (§ 5.1). Ce catalogue est alimenté notamment par les essais et maquettes réalisés en collaboration à l'international.

¹⁰⁷ Ces études comprennent une évaluation des avantages et des limites de l'utilisation de formulations bas pH par rapport à des formulations plus usuelles.

l'industrie minière et des travaux souterrains¹⁰⁸. Elles sont complétées par des essais de dépose au Laboratoire souterrain en conditions représentatives, d'abord dans l'unité silto-carbonatée du Callovo-oxfordien (essai DDZ de dépose de cintres dans la galerie au niveau -445 m, 2014-2015) puis dans l'unité argileuse¹⁰⁹ (2019-2020).

L'ensemble de ces travaux s'attachent :

- aux modalités opérationnelles et de sécurité du chantier de dépose,
- à la limitation et l'évaluation des conséquences mécaniques sur les argilites, particulièrement l'extension et les propriétés de la zone d'argilites fracturées,
- à l'état final de la paroi, en considérant les possibilités de purge et de reprise de cette paroi dans l'objectif d'obtenir un état de surface le plus régulier possible.

Au-delà du déconfinement des argilites lors de la dépose du revêtement, les travaux de modélisation de l'évolution de la zone fracturée concernent aussi les processus tendant à refermer les fractures à plus long terme, notamment la pression exercée par le gonflement du noyau. Ces travaux s'appuient sur des études expérimentales (essai CDZ de compression de l'EDZ au Laboratoire souterrain en 2014, éventuellement complétés par d'autres essais à l'horizon de 2019-2020).

Coupures hydrauliques

La conception des coupures hydrauliques, particulièrement la définition de leurs méthodes de réalisation, se poursuit dans le cadre des phases d'avant-projet sommaire et détaillé du projet Cigéo.

La transposition des résultats expérimentaux acquis à l'échelle des coupures de Cigéo¹¹⁰ s'effectue par la simulation. En complément il est envisagé de réaliser une saignée à l'échelle 1/1 au Laboratoire souterrain à l'horizon de 2019.

Performances globales

Des simulations numériques hydromécaniques intégrées, consolidant les résultats des travaux décrits ci-dessus, permettent d'évaluer les performances globales des différents types de scellements. Elles fournissent l'évolution des contraintes et des déformations dans les différentes composantes du scellement et dans les argilites à leur pourtour, le schéma de resaturation (y compris le transfert des gaz) et permettent l'évaluation de leur conductivité hydraulique.

7.1.5 Démonstration en environnement opérationnel, qualification de la définition et des procédés de réalisation des scellements (2021-2035 ; TR 7/8)

La vérification, en environnement opérationnel, de la capacité à réaliser les scellements selon les spécifications puis l'observation de leur évolution spatio-temporelle sur une longue durée s'effectuent en environnement opérationnel dans Cigéo, en réalisant, testant et observant des démonstrateurs de scellements représentatifs de l'ensemble des aspects de la conception ressortant des études d'APD¹¹¹.

¹⁰⁸ Reprises de soutènements, maintenance ou élargissement de tunnels etc.

¹⁰⁹ La programmation plus tardive du second essai permet de mieux représenter expérimentalement l'évolution du chargement mécanique du revêtement au cours du temps.

¹¹⁰ Comme indiqué dans les sections précédentes, la zone de plus forte perméabilité au droit des noyaux argileux ne se développe pas de manière isotrope autour des galeries. Compte tenu de la section des galeries de Cigéo, on doit considérer une extension maximale de cette zone et par conséquent une profondeur de saignée supérieure à celle qui a été testée jusqu'ici (les essais ont porté sur une saignée circulaire de profondeur 2,5 m par rapport à la paroi de galerie).

¹¹¹ Dans un avis émis en juillet 2011, l'ASN estimait « *nécessaire que l'Andra ait recours pour la qualification de ces ouvrages à des démonstrateurs in situ à une échelle représentative des ouvrages à réaliser* ». Dans son rapport d'évaluation n°7 (novembre 2013), la CNE indique : « *Comme pour tous les scellements d'ouvrages souterrains présentant des objectifs élevés d'efficacité, des prototypes à échelle réduite peuvent utilement contribuer à la conception. Toutefois, la conviction ne pourra être complètement emportée que par des essais à échelle 1 réalisés dans les conditions réelles or il s'agit d'ouvrages de trop grandes dimensions pour être placés dans le laboratoire souterrain.* » Elle écrit aussi : « *si le programme de recherches doit s'attacher au choix des matériaux (béton et argile gonflante) et à l'analyse de performance à très long terme, il doit aussi démontrer la faisabilité industrielle de leur mise en place dans les conditions du fond* ». Dans son avis du 16 juillet 2014, le GPD insiste sur « *l'importance de ces scellements pour éviter que les ouvrages souterrains ne deviennent des voies de*

Compte tenu des différents types de scellements prévus dans Cigéo et de leurs spécificités, sont prévus :

- un démonstrateur de scellement de descenderie,
- un démonstrateur de scellement de galerie,
- un démonstrateur de coupure hydraulique représentatif du fonctionnement du concept de scellement étudié en variante.

L'atteinte du TRL 7 au moyen de ces démonstrateurs est conditionnée (i) au respect, lors de leur réalisation, de l'ensemble des exigences techniques spécifiées, (ii) à la démonstration de la satisfaction des performances attendues, après fermeture définitive, notamment par des simulations de la conductivité hydraulique globale de chaque type de scellement et des circulations d'eau et de gaz dans l'ensemble du stockage. Cette étape permet de préparer la réalisation de premiers scellements de galerie réels à l'horizon 2040, si le choix en est fait.

Concernant les scellements de puits, la perspective à terme d'une fermeture du Laboratoire souterrain offre la possibilité d'y réaliser une démonstration de scellement d'un puits représentatif ayant été exploité et observé préalablement pendant plusieurs dizaines d'années, puis de suivre, sur la durée, l'évolution de l'ouvrage scellé.

transfert préférentielles ; il estime dès lors qu'un essai in situ en vraie grandeur en complément des essais déjà réalisés sera nécessaire pour vérifier la faisabilité industrielle de ces scellements et montrer la possibilité d'atteindre les performances visées ».

Déroulement des travaux sur les scellements

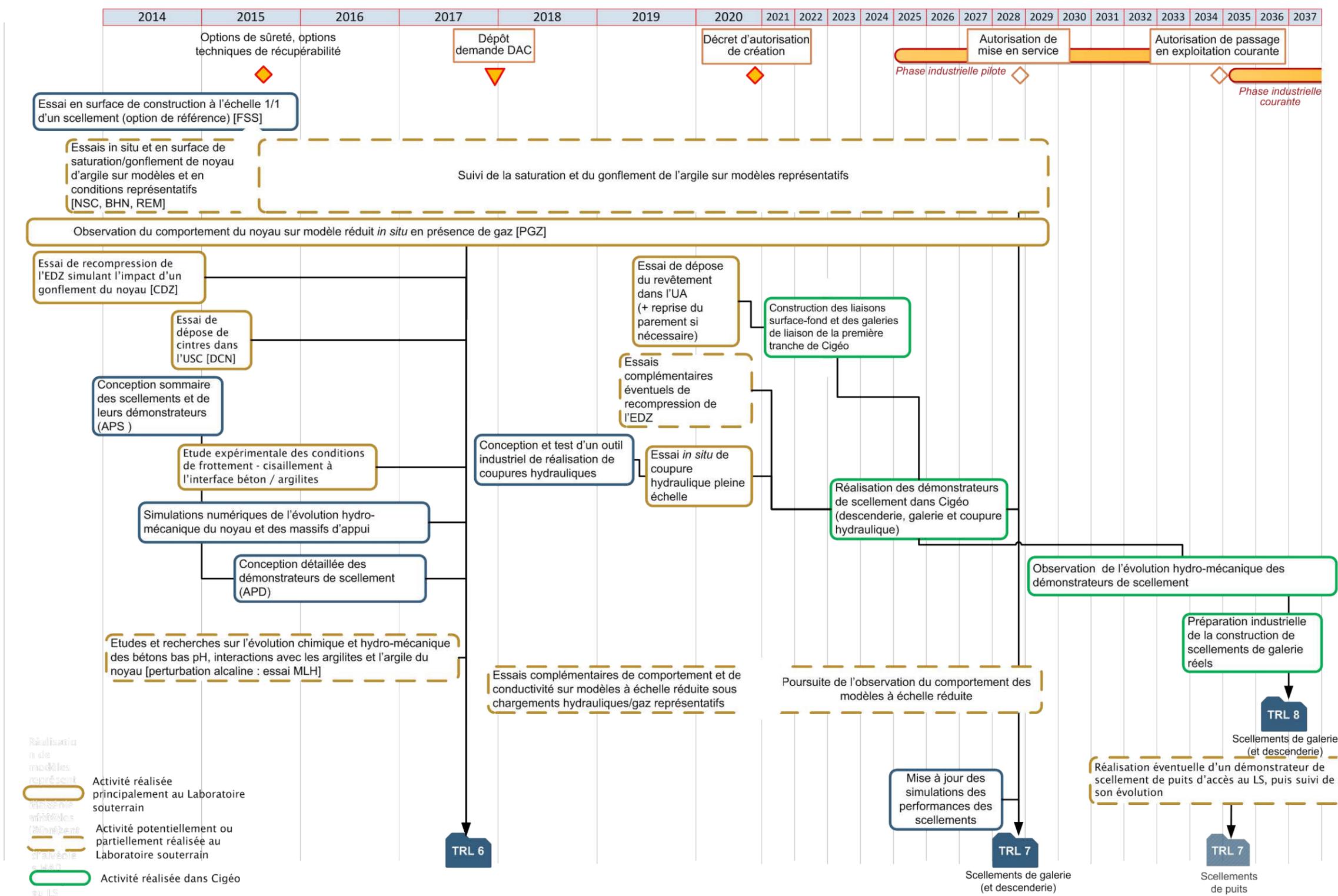


Figure 7.1-1 Logigramme des études et travaux sur les scellements

7.2 Autres ouvrages de fermeture

Les autres ouvrages de fermeture de Cigéo ont pour fonction principale de remplir les vides pour limiter les déformations à long terme des argilites. De plus les bouchons de micro-tunnels de stockage ont aussi pour rôle de préserver, dans les alvéoles, un environnement physico-chimique favorable au verre nucléaire¹¹².

Les remblais ont fait l'objet d'essais en conditions représentatives (en surface) et de travaux de caractérisation.

Un travail de reconception des bouchons d'alvéole HA est en cours pour (i) les adapter à la conception de la tête d'alvéole et aux fonctionnalités attendues, (ii) définir des techniques de mise en œuvre.

8. Références

- [1] Loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 de programme relative à la gestion durable des matières et de déchets radioactifs (JO du 29 juin 2006). [Articles L. 542-1 et suivants du Code de l'Environnement]
- [2] Programme industriel de gestion des déchets – Projet Cigéo (Andra CG.PE.ADPG.11.0074)
- [3] Référentiel du site de Meuse/Haute-Marne (Andra CR PA DS 09 0007)
- [4] Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde (ASN 2008)
- [5] Exigences applicables - Projet Cigéo (Andra 2011 CIGEO.SP.ADPG.11.0020)
- [6] Réversibilité des décisions et récupérabilité des déchets radioactifs – Eléments de réflexion pour les programmes nationaux de stockage géologique (OCDE 2012, AEN n° 7105)
- [7] Norme ISO 16290:2013, novembre 2013 : « Systèmes spatiaux - Définition des Niveaux de Maturité de la Technologie (NMT) et de leurs critères d'évaluation ».
- [8] Bilan des études et recherches sur l'entreposage - Déchets radioactifs de haute activité et de moyenne activité à vie longue (Andra CRPADPG130001, décembre 2012)
- [9] Bilan du débat public - Projet de centre de stockage réversible profond de déchets radioactifs en Meuse / Haute-Marne (Cigéo) 15 mai - 15 décembre 2013 - dressé par le Président de la Commission nationale du débat public - 12 février 2014
- [10] Débat public CIGEO - Conférence de citoyens - Présentation de l'avis du panel de citoyens - CNDP 3 février 2013
- [11] Projet Cigéo – Scellements – Options de conception et programme d'essais (Andra CG.NT.AGPG.13.0003, janvier 2014)

¹¹² Dans son avis [cf. CODEP-MEA-2014-030920] du 16 juillet 2014, le GPD note, concernant les bouchons d'alvéoles HA, que « *L'Andra ne leur affecte plus d'objectif de performance hydraulique dans la mesure où elle estime que celle-ci n'influence quasiment pas la circulation de l'eau dans le stockage en situation normale de fonctionnement de l'installation. Le groupe permanent estime pour sa part que des évaluations complémentaires, prenant en considération les phases hydrauliques transitoires et des situations dégradées de fonctionnement de l'installation, seront toutefois nécessaires en vue de conforter le bien-fondé de l'approche retenue.* »

CHIFFRAGE CIGÉO EN PHASE ESQUISSE

Estimation du coût de base
Maîtrise d'ouvrage Andra et Maîtrise d'oeuvre

Identification

CG.TE.F.NTE.AMOA.EEE.0000.14.0067/B

Octobre 2014

Pages : **13**

SOMMAIRE

1. Objet du document	5
2. Maîtrise d'ouvrage	5
2.1 <i>Réalisation de la tranche 1 (2012-2028)</i>	5
2.2 <i>Investissements ultérieurs</i>	5
3. Maîtrise d'œuvre	6
3.1 <i>Maîtrise d'œuvre de conception</i>	6
3.2 <i>Maîtrise d'œuvre de réalisation</i>	6
3.3 <i>Synthèse</i>	8
4. Autres activités sous maîtrise d'ouvrage Andra	9
5. Plan de développement des composants du projet Cigéo et simulations associées	10

TABLES DES ILLUSTRATIONS

Tableaux

Tableau 1 – Synthèse des activités de maîtrise d’ouvrage	5
Tableau 2 – REX pour l’évaluation du taux de MOA	6
Tableau 3 – Coûts de MOe de conception en tranche 1 (période 2012-2028)	6
Tableau 4 – Données pour l’évaluation du taux de MOe de réalisation (travaux et équipements conventionnels)	7
Tableau 5 – Données pour l’évaluation du taux de MOe de réalisation (installation souterraine)	7
Tableau 6 – Données pour l’évaluation du taux de MOe de réalisation (bâtiments nucléaires)	7
Tableau 7 – Taux de MOe, AMO réglementaires et MOA retenus par l’Andra	8
Tableau 8 – Synthèse des activités sous MOA Andra	9
Tableau 9 – Plan de développement des composants du projet Cigéo et simulations associées	12

1. Objet du document

Ce document a pour objet de présenter l'évaluation des activités suivantes :

- Maîtrise d'ouvrage Andra des opérations d'investissement (tranche 1, tranches ultérieures de construction) / jouvence / démantèlement et fermeture) et assistance à maîtrise d'ouvrage ;
- Maîtrise d'œuvre (conception et réalisation) ;
- Autres activités sous maîtrise d'ouvrage Andra (Laboratoire souterrain, R&D, essais technologiques).

Ces activités sont distinctes des activités d'exploitation, qui sont évaluées dans la note « *Estimation du coût de base de l'exploitation* ».

Au-delà de la période de programmation budgétaire de l'Agence (2014-2018), le chiffrage ne constitue pas à ce stade une prévision budgétaire de l'Andra.

Le chiffrage est réalisé aux conditions économiques de janvier 2012 et tous les coûts sont présentés hors taxe.

2. Maîtrise d'ouvrage

2.1 Réalisation de la tranche 1 (2012-2028)

En ce qui concerne la tranche 1, les coûts ci-dessous incluent la maîtrise d'ouvrage (MOA) conception industrielle et l'assistance à maîtrise d'ouvrage (AMO) associée¹, les activités management et gestion de projet, l'observation de l'environnement, la communication et l'insertion territoriale, les dépenses d'acquisition foncières, les frais communs et les recettes. Ces budgets correspondent aux dépenses prévues au PMT (exercice 2013-2018). Le chiffrage sur la période 2019-2028 est réalisé à ce stade par extrapolation de l'année 2018 du PMT. Les dépenses sont présentées aux conditions économiques 2012.

	2012-2018	2019-2028
Maîtrise d'ouvrage Andra	305 M€	409 M€
Maîtrise d'ouvrage de conception et AMO	68 M€	123 M€
Management et gestion du projet	136 M€	200 M€
Observation environnement	38 M€	43 M€
Communication et insertion territoriale	32 M€	43 M€
Acquisitions foncières	12 M€	
Frais communs et recettes diverses	20 M€	
	~45 M€/an	~40 M€/an

Tableau 1 - Synthèse des activités de maîtrise d'ouvrage

2.2 Investissements ultérieurs

Au-delà de la tranche 1, la méthode retenue pour estimer le coût de maîtrise d'ouvrage pour le pilotage des investissements est l'application d'un taux sur l'assiette d'investissement. Le ratio couvre le pilotage de la conception et de la réalisation. L'assiette est identique à celle retenue pour l'estimation du coût de maîtrise d'œuvre, elle exclut ainsi les dépenses de maîtrise d'œuvre. Le taux moyen retenu à ce stade pour le chiffrage correspond à **3 %** de l'assiette d'investissement. Ce taux se situe en fourchette basse des autres éléments de retour d'expérience recueillis, qui sont récapitulés dans le tableau ci-après.

¹ Les missions d'assistance à maîtrise d'ouvrage couvrent notamment les activités de contrôle technique, coordination Sécurité et Protection de la Santé (SPS), coordination des systèmes de sécurité incendie, Haute Qualité Environnementale.

Nature des données	Installations	Taux
REX Andra	CSTFA (ICPE)	7%
REX CEA	Installations CEA	$18\% \times (\text{Inv.}/100\text{M€})^{(0,57-1)*}$
REX SETEC TPI (pour le compte du MOA)	Chantier LGV / 0,9 Md€ sur 6 ans	7,5% y compris AMO-R et assurance TRC
Estimation Areva TA sous MOA CEA	Entreposage de longue durée en surface	4%

Tableau 2 – REX pour l'évaluation du taux de MOA

*Le CEA a transmis une formule d'évaluation du ratio de maîtrise d'ouvrage fondée sur l'exploitation de son retour d'expérience de construction de bâtiments nucléaires. Le CEA a précisé que le REX est disponible pour des investissements jusqu'à 500 M€ et que l'extrapolation au-delà est à analyser. L'exploitation du retour d'expérience du CEA sur des projets d'investissement pluriannuel de quelques centaines de M€ (ordre de grandeur des opérations d'investissement sur Cigéo) conduirait ainsi à des taux de maîtrise d'ouvrage de plus de 10%.

Au-delà de la tranche 1, le coût des assistances à maîtrise d'ouvrage réglementaires est estimé à **0,5 %** de l'investissement.

Les chiffres associés sont présentés dans les notes dédiées à chaque sous-système.

3. Maîtrise d'œuvre

3.1 Maîtrise d'œuvre de conception

La maîtrise d'œuvre de conception (MOe) concerne les missions d'esquisse et d'avant-projet.

Les missions de conception pour la tranche 1 sont évaluées à partir des coûts des marchés de maîtrise d'œuvre sous-système.

Les coûts de MOe de conception sont présentés aux conditions économiques de janvier 2012.

2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019 à 2028	Total
12.8 M€	16.1 M€	64.0 M€	48.1 M€	52.8 M€	34.5 M€	3.5 M€	0 M€	232 M€

Tableau 3 – Coûts de MOe de conception en tranche 1 (période 2012-2028)

Pour les tranches ultérieures de travaux, les missions de conception correspondent à un complément de définition sur la base du dossier d'autorisation de création (DAC). Le taux retenu à ce stade pour le chiffrage est un taux moyen de **2 %** de l'assiette d'investissement. Ce taux est inférieur aux ratios usuellement retenus car il prend en compte les études déjà réalisées sur Cigéo à terminaison. A ce stade du projet et étant donné les échéances de dépenses associées, il est appliqué indifféremment aux ouvrages répétitifs (alvéoles MAVL et HA) comme aux ouvrages plus singuliers (comme le bâtiment nucléaire EP2 ou les galeries de liaison HA).

3.2 Maîtrise d'œuvre de réalisation

La maîtrise d'œuvre de réalisation concerne a minima les missions :

- Etudes de projet (PRO) ;
- Assistance à la passation des contrats de travaux (ACT) ;
- Visa des études d'exécution (VISA) ;
- Direction de l'exécution des travaux (DET) ;
- Assistance aux opérations de réception (AOR).

Les missions identifiées sont telles que décrites par la loi n°85-704 du 12 juillet 1985 relative à la maîtrise d'ouvrage publique et à ses rapport avec la maîtrise d'œuvre privée, dite loi MOP. Cette décomposition est conforme à la logique de déroulement du projet.

Les taux de maîtrise d'œuvre sont différenciés par sous-système, selon la complexité des installations.

Installations conventionnelles de surface et installations transverses

Nature des données	Installations	Taux
Retour d'expérience (REX) Andra	CSTFA (ICPE)	14 %
REX Andra	Espace Technologique	12,5 %
REX EDF	Bâtiments tertiaires standards	6 %

Tableau 4 - Données pour l'évaluation du taux de MOe de réalisation (travaux et équipements conventionnels)

- L'Andra retient pour le chiffrage un ratio de **6 %**.

Installation souterraine

Nature des données	Installations	Taux
REX	Chantier Tunnel sous la Manche	23%
Estimation Colenco sous MOA CEA	Entreposage de longue durée en subsurface	17%
Estimation SETEC TPI	Ouvrages souterrains du Dossier 2009	11% en moyenne (y compris répétitivité, hors contexte nucléaire)
Avis d'expert Jean Philippe Expert travaux souterrains	Creusement au tunnelier	Fourchette de 7% à 9% (hors spécificités Cigéo)
REX	Tunnel liaison Cordou-Malaga (transposable descenderies)	12 %
REX	Extension métro Barcelone (transposable galeries souterraines argilite)	13 %
REX	Laboratoire souterrain - galeries courantes	9,5 %
Estimation EDF		6 %

Tableau 5 - Données pour l'évaluation du taux de MOe de réalisation (installation souterraine)

- L'Andra retient pour le chiffrage un ratio de **11 % pour la tranche 1** (chantier souterrain complexe avec beaucoup d'interfaces) et de **8 % pour les tranches ultérieures**.

Bâtiments nucléaires

Nature des données	Installations	Taux
REX SGN	EIP, ECC, D/E EDS, D/E EB	30% à 36%
REX CEA	Installations CEA	20% à 40% selon la complexité
REX Areva	« affaires récentes »	20% à 25%
Estimation Areva TA sous MOA CEA	Entreposage de longue durée en surface	Fourchette de 15% à 20% (caractère modulaire)
Proposition SGN	Bâtiment de surface Dossier 2005	Fourchette de 27,5% à 33%
Proposition SGN	Bâtiment de surface Dossier 2009	25%
Proposition Areva et SGN	Bâtiment de surface Dossier STI Producteurs	25%
Estimation EDF		10%

Tableau 6 - Données pour l'évaluation du taux de MOe de réalisation (bâtiments nucléaires)

- L'Andra retient pour le chiffrage un ratio de **20 %**.

Equipements nucléaires (transfert et manutention)

Les équipements nucléaires comprennent l'ensemble des équipements de transfert et de manutention hors du périmètre du bâtiment nucléaire.

Le retour d'expérience fourni par SGN dans le cadre des études du Dossier 2009 est de l'ordre de 30% de maîtrise d'œuvre de réalisation pour un équipement. Pour une commande groupée (de 8 équipements en simultané), SGN préconise un ratio de 17%.

- L'Andra retient pour le chiffrage un ratio de **17 %** pour la tranche 1 et **12 %** pour les tranches ultérieures pour prendre en compte les effets de répétitivité.
- Pour ce qui concerne le funiculaire, l'Andra retient pour le chiffrage un ratio de **10 %** compte tenu du montage contractuel.

3.3 Synthèse

Le tableau suivant présente tous les taux retenus par tranche et en fonction des différents sous-systèmes.

Les chiffrages associés sont présentés dans les notes dédiées à chaque sous-système.

Tranches	Types	Taux
Tranche 1	MOe de réalisation	SS1 : 17%
		SS2 : 20%
		SS3/SS5 : 6%
		SS4 : 11%
		SS8 : 10%
Tranches ultérieures	MOA	Tous SS : 3%
	AMO réglementaires	Tous SS : 0.5%
	MOe de conception	Tous SS : 2%
	MOe de réalisation (y/c jouvence et démantèlement)	SS1 : 12%
		SS2 : 20%
		SS3/SS5 : 6%
		SS4 : 8%
		SS8 : 10%

Tableau 7 - Taux de MOe, AMO réglementaires et MOA retenus par l'Andra

4. Autres activités sous maîtrise d'ouvrage Andra

Le plan de développement des composants du projet (CG.PDD.ADPG.14.0031) décrit l'articulation des travaux d'ingénierie, de R&D et d'essais en support à l'élaboration de la demande d'autorisation de création du centre de stockage puis en support à la préparation de la mise en service et à la phase industrielle pilote. Il considère à la fois les concepts techniques pris en référence au stade actuel du projet et les opportunités. L'Andra a choisi d'utiliser l'échelle internationale TRL (norme ISO 16290 : 2013) comme outil d'appréciation de la progression technique du projet.

Le programme d'essais technologiques comprend les essais menés par l'Andra au Laboratoire souterrain, dans des ateliers en surface ou dans Cigéo pour qualifier les composants du stockage (conteneurs de stockage MAVL et HA, alvéoles et quartiers de stockage MAVL et HA, moyens d'exploitation MAVL et HA, ouvrages de fermeture, galeries de liaison, moyens de transfert des colis de déchets). L'estimation préliminaire du budget des essais technologiques jusqu'à la fin de la phase industrielle pilote a été réalisée sur la base du plan de développement.

Sur toute la période d'exploitation du stockage, l'expertise scientifique et les activités de R&D seront poursuivies en support aux opérations et à l'optimisation du stockage. En 2012, l'Agence d'évaluation de la recherche (AERES) a invité l'Andra à affirmer son leadership dans la définition et le pilotage de la stratégie de R&D en matière de déchets avec les acteurs de la filière nucléaire et à accompagner le passage progressif à la phase industrielle du projet Cigéo avec un maintien de l'effort de recherche fondamentale. L'expertise scientifique développée par l'Andra sera d'abord mobilisée en accompagnement de la phase industrielle pilote (préparation et mise en œuvre des instrumentations des alvéoles et des ouvrages témoins, observation, interprétation des données...). L'estimation préliminaire du budget des activités de R&D et d'expertise scientifique jusqu'à la fin de la phase industrielle pilote a été réalisée sur la base du plan de développement.

L'autorisation d'exploiter le Laboratoire souterrain a été prolongée jusqu'à fin 2030 pour accompagner la phase de démarrage de Cigéo. Après cette phase de démarrage, il conviendra d'examiner l'intérêt éventuel de poursuivre certains essais au Laboratoire souterrain. Il pourrait ainsi s'avérer intéressant de poursuivre certaines acquisitions de données expérimentales sur le long terme dans le Laboratoire souterrain ou d'avoir la possibilité de réaliser des essais en dehors de l'installation nucléaire de base constituée par le centre de stockage. Pour le chiffre, les activités liées au Laboratoire souterrain sont évaluées jusque fin 2030, sans préjudice de leur poursuite éventuelle au-delà. Les coûts de fermeture ne sont pas pris en compte à ce stade. Les coûts liés à l'exploitation du Laboratoire souterrain sont considérés stables jusqu'en 2024. Sur la période 2025-2030, il est fait l'hypothèse d'une réduction d'un quart des budgets (mutualisation avec Cigéo et hypothèse d'une activité réduite).

	2012-2018	2019-2024	2025-2034	>2034
Autres activités sous maîtrise d'ouvrage Andra	591 M€	487 M€	490 M€	
<i>Essais technologiques</i>	192 M€	163 M€	159 M€	Non évalué
<i>R&D</i>	178 M€	134 M€	188 M€	Non évalué
<i>Laboratoire souterrain</i>	221 M€	190 Me	143 M€	Non évalué
	~84 M€/an	~81 M€/an	~49 M€/an	

Tableau 8 - Synthèse des activités sous MOA Andra

Plan de développement des composants du projet Cigéo et simulations associées (en M€ 2012)

Conteneur de stockage HA	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	Total	Commentaires		
Démonstration en environnement représentatif de la durabilité de l'étanchéité du conteneur	0.3	0.9	0.9	1.0	1.8	1.0																			5.9	Etudes aciers, procédés de fabrication	
Démonstration en environnement opérationnel des performances du conteneur							0.9	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1					4.1	Réalisation de modèles représentatifs sur la base APD et réalisation d'essais de durabilité	
Qualification et mise en œuvre												SS2	SS2	SS2	SS2	SS2											Mise en place du système industriel de fabrication des corps et couvercles, essais inactifs d'assemblage
Fabrication de colis réels																			Exploit.	Exploit.	Exploit.	Exploit.	Exploit.	Exploit.			Fabrication et essais en actif.
R&D	1.7	1.4	1.3	1.4	1.3	1.3	1.6	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	22.5	Etudes sur la corrosion, le comportement mécanique et le couplage corrosion-mécanique (échelles acier et conteneur) dans les environnements THMCR des alvéoles - Appui à la conception détaillée, au suivi des essais et à la phase industrielle pilote	
Total	1.9	2.4	2.2	2.4	3.0	2.3	2.5	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	32.5									

Micro-tunnel de stockage HA	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	Total	Commentaires		
Evaluation en environnement représentatif de la performance mécanique du chemisage	3.7	2.1	0.3	1.7	3.5	5.1																			16.4	Réalisation de modèles représentatifs d'alvéoles HAO (80 ml) au Laboratoire et instrumentations associées (comportement mécanique du chemisage, remplissage de l'annuaire)	
Démonstration en environnement opérationnel							0.5	1.4	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2												9.1	Réduction des temps opérationnels, répétitivité et fiabilisation du matériel.	
Qualification et mise en œuvre industrielle												SS4			Construction premières alvéoles dans Cigéo et essais inactifs de mise en place et retrait de colis.												
Essais d'optimisation de la longueur des alvéoles jusqu'à 150m														1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2						7.2	Essais au Laboratoire ou dans Cigéo	
R&D	2.8	3.1	2.3	2.4	2.1	2.7	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	46.7	Etudes du comportement mécanique des chemisages, de l'évolution physico-chimique du matériau de remplissage et du comportement des argillites en champ proche - études des échanges hydriques et gazeux au sein de l'alvéole et avec la galerie - étude de la corrosion du chemisage ; appui à la conception détaillée, au suivi des essais et à la phase industrielle pilote	
Total	6.5	5.2	2.6	4.1	5.7	8.3	3.2	3.0	1.8	1.8	1.8	1.8	79.4														

Quartier de stockage HA	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	Total	Commentaires		
Conception de quartiers HA, évaluation de leur fonctionnement thermo-hydro-mécanique			SS4	SS4	SS4	SS4																					
Conception de quartiers HA, évaluation de leur fonctionnement thermo-hydro-mécanique			SS4																								
Démonstration sur modèles représentatifs						1.0	2.0	3.0	3.0	0.5	0.5	0.5	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2						11.9	Essais THM au LS	
Mise en œuvre du quartier HAO												SS4			Construction et observation du quartier HAO dans Cigéo												
R&D	2.0	1.4	1.6	1.7	1.5	1.3	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	24.7	Etudes des propriétés à la rupture des argillites sur des chemins THM en extension (définition des marges sur les critères de rupture pour le dimensionnement thermique) - suivi de la réponse THM des argillites en grand dans la zone HAO de la tranche 1	
Total	2.0	1.4	1.6	1.7	1.5	2.3	3.4	4.4	4.4	1.9	1.9	1.9	0.8	0.6	0.6	0.6	0.6	36.6									

Moyens d'exploitation HA (mise en place et retrait des colis, moyens de surveillance)	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	Total	Commentaires	
Etudes et essai de système de mise en place et de retrait de colis			0.4	0.3																					0.7	
Essais du système de mise en place et retrait de colis							1.0	2.5	1.0																4.5	Essais sur base études APD SS1
Démonstration de retrait de colis et des procédés de déconstruction en situation représentative								1.0	2.0	2.5	2.5	2.5	1.0	1.0											12.5	
Test en inactif des équipements réels de mise en place et retrait des colis												SS1														
Essais en conditions opérationnelles avec déconstruction du bouchon et remise en configuration de l'alvéole												SS1														
Démonstration de retrait pendant la phase d'essais en actif																		Exploit.	Exploit.	Exploit.	Exploit.	Exploit.	Exploit.			
R&D	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		pris en compte dans le chiffrage supra
Total	0.0	0.0	0.4	0.3	0.0	0.0	1.0	3.5	3.0	2.5	2.5	2.5	1.0	1.0	0.0	17.7										

Plan de développement des composants du projet Cigéo et simulations associées (en M€ 2012)

Ouvrages de fermeture	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	Total	Commentaires		
Evaluation en environnement représentatif des performances hydrauliques et mécaniques des scellements	6.1	5.4	4.1	3.1	0.7	1.1	2.2	2.2	0.5																25.4		
Démonstration en environnement opérationnel (dans Cigéo), qualification de la définition et des procédés de réalisation des scellements										1.0	2.5	5.0	7.5	12.0	12.0											40.0	Essai dans Cigéo - scellement en rampe
Démonstration en environnement opérationnel (dans Cigéo), qualification de la définition et des procédés de réalisation des scellements												1.0	3.0	5.0	8.0	12.0	11.0									40.0	Essai dans Cigéo - scellement en galerie horizontale.
Démonstration en environnement opérationnel (dans Cigéo), qualification de la définition et des procédés de réalisation des scellements							2.0	5.0																		7.0	Développement outils pour essai coupure hydraulique
Démonstration en environnement opérationnel (dans Cigéo), qualification de la définition et des procédés de réalisation des scellements												0.5	1.5	2.5	4.0	6.0	5.5									20.0	Coupure hydraulique
Préparation industrielle de la construction de scellements de galeries réelles																	SS4	SS4	SS4	SS4	SS4	SS4	SS4	SS4			
R&D	0.6	0.6	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	11.2	Etudes des caractéristiques hydromécaniques des mélanges de pellets de bentonite et des bétons bas pH, notamment en interaction (perturbation alcaline) et des interfaces entre pellets/béton/argillites, des caractéristiques au cisaillement des argillites en champ proche, et de la dégradation chimique des bétons bas pH (incluant la contribution à la définition puis le suivi des démonstrateurs dans la tranche 1)
Total	6.7	6.0	4.5	3.6	1.2	1.6	4.6	7.7	1.0	1.5	3.0	7.0	12.5	20.0	24.5	18.5	17.0	0.5	143.6								

Liaisons surface-fond et galeries de liaison	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	Total	Commentaires		
Conception, démonstration de performance en environnement représentatif	0.4	0.4	8.6	3.9	1.7	1.1	0.2	0.5																		16.8	Poursuite des observations au Laboratoire avec différentes méthodes de construction et différents types de revêtements (GRM3 pour DPC, GER pour revêtement en direction horizontale mineure).
Démonstration des performances en environnement opérationnel							2.0	5.0	5.0	0.5	0.5	0.5														13.5	Essais complémentaires suite aux études APD
Qualification et mise en œuvre										SS4																	
R&D																											
Total	0.4	0.4	8.6	3.9	1.7	1.1	2.2	5.5	5.0	0.5	0.5	0.5	0.0	30.3													

Moyens de transfert de colis de déchets	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	Total	Commentaires		
Contrat conception-construction attribué pour transfert en rampe	0.6	0.4	SS8		1.0																						
Total	0.6	0.4	0.0	1.0																							

Evaluation globale de performance et de sûreté	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	Total	Commentaires	
Regroupe toutes les activités de simulation	3.8	2.4	2.7	4.2	4.0	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	60.5	Intégration des connaissances - modélisation et simulation de l'évolution THMCR des différents composants du stockage en appui aux évaluations de sûreté et de réversibilité et aux études d'optimisation
Total	3.8	2.4	2.7	4.2	4.0	2.4	60.5																			

Main d'œuvre Andra	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	Total	Commentaires	
Main d'œuvre DT/CMHM, DRD, DIP (programmes ET, R&D et simu)	13.8	13.9	12.9	13.0	13.7	13.9	14.0	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	290.3	
Total	13.8	13.9	12.9	13.0	13.7	13.9	14.0	13.5	10.0	290.3																

Total Essais techno, R&D et simulations associées	58.1	55.3	48.0	52.6	49.7	47.0	59.4	74.3	50.7	39.7	38.7	45.2	48.7	60.2	48.7	43.7	44.2	45.2	23.2	21.2	21.2	19.7	19.7	1 014	
--	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	--------------	--

Tableau 9 - Plan de développement des composants du projet Cigéo et simulations associées



**AGENCE NATIONALE POUR LA GESTION
DES DÉCHETS RADIOACTIFS**

1-7, rue Jean-Monnet
92298 Châtenay-Malabry cedex

www.andra.fr